

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**SYDNEY DE OLIVEIRA DIAS**

**ESTUDOS SOBRE A DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS  
EMPREGANDO IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO – IKONOS II**

**CURITIBA  
2011**

**SYDNEY DE OLIVEIRA DIAS**

**ESTUDOS SOBRE A DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS  
EMPREGANDO IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO – IKONOS II**

**Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Geodésicas, setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências  
Geodésicas.**

**Orientador:  
Profº. Dr. Edson Aparecido Mitishita**

**CURITIBA  
2011**

Dias, Sydney de Oliveira

Estudos sobre a determinação de coordenadas tridimensionais  
empregando imagens de alta resolução – IKONOS II / Sydney de Oliveira  
Dias – Curitiba, 2011.

181 f.: il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

Tese (Doutorado) – Tese apresentada como requisito Parcial à  
obtenção do grau de Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do  
Paraná.

Inclui Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Satélites artificiais em sensoriamento  
Remoto. 3. Processamento de imagens. I. Título. II. Mitishita, Edson  
Aparecido. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 528.78

## TERMO DE APROVAÇÃO

SYDNEY DE OLIVEIRA DIAS

"ESTUDOS SOBRE A DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS  
EMPREGANDO IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO - IKONOS II"

Tese nº 76 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador:




Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita  
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli  
Universidade Estadual Paulista, UNESP



Prof. Dr. Lênio Soares Galvão  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE



Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto  
Departamento de Estatística, UFPR



Prof. Dr. Hideo Araki  
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 29 de julho de 2011.

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, à minha esposa Michele, ao meu filho Gabriel, aos amigos e a todos os que sempre me deram total apoio e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Paraná pela oportunidade e oferta do curso de doutorado.

Ao Colegiado do Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte financeiro, na forma de bolsa de estudos de doutorado.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas bem como os do Setor de Ciências da Terra.

À amiga e secretária do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas Mônica Verali por toda ajuda, apoio, suporte e excelente dedicação ao Programa.

Aos colegas e amigos Glauber Acunha Gonçalves, John Alejandro Fierro, Álvaro Machado, Marcis Mendonça, Vaneza Andréia, Rogers, João Batista Jr., Paula Debiasi, Tiago Rodrigues e Elmo Tanajura.

Aos amigos Vagner Gonçalves Ferreira e Alessandro Salles que durante alguns anos foram como irmãos.

Um agradecimento especial ao amigo João Batista Ramos Côrtes que muitas vezes esteve presente como um irmão e, principalmente, companheiro de estudo.

Um agradecimento ao professor Quintino Dalmolin.

À todos os colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o êxito no trabalho desenvolvido.

Finalmente, um agradecimento especial ao meu orientador, o professor Dr. Edson Mitishita.

## RESUMO

O crescente avanço tecnológico, ocorrido nos últimos anos, tanto na área da informática quanto na área de Sensoriamento Remoto, vem contribuindo para diversas pesquisas que envolvem reconstrução tridimensional a partir de imagens de alta resolução. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um estudo experimental visando analisar o desempenho de modelos matemáticos aproximados e rigorosos na orientação de um par estereoscópico IKONOS II para a determinação de coordenadas tridimensionais via intersecção espacial. Três foram os modelos aproximados testados, a função racional - RFM, a Transformação Linear Direta - DLT e a transformação Afim de Projeção Paralela - APM e os modelos rigorosos de posição e rotação com 9 e 12 parâmetros. Os experimentos realizados avaliaram os cinco modelos na orientação exterior do par com diferentes configurações de pontos de apoio e em cada uma das configurações foram determinadas coordenadas tridimensionais, via intersecção espacial, de 20 pontos de verificação. As análises de precisões e exatidões planimétrica e altimétrica foram realizadas em cada um dos experimentos visando a verificação do desempenho dos modelos. Testes estatísticos para avaliação de exatidões obtidas empregaram o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) de uma carta na escala de 1:5000 com valor de 5 metros de equidistância entre curvas de nível. Os resultados obtidos nos experimentos realizados mostraram que o modelo RFM foi o que apresentou o melhor desempenho quando comparado com a relação número de pontos de apoio versus exatidão obtida. Entretanto, qualquer um dos cinco modelos testados, permite a obtenção informações tridimensionais com exatidões enquadradas no PEC classe A na escala de 1/5000.

Palavras-chave: Orientação de imagens orbitais. Intersecção Espacial. DLT. APM. RPC. Modelos rigorosos.

## ***ABSTRACT***

In recent years, the technological advances in Computing Sciences and Remote Sensing areas have contributed for the development of several researches related with three-dimensional reconstruction from high-resolution images. The present work aims to develop an experimental study that has the main purpose to analyze the performance of approximate and rigorous mathematical models to perform the exterior orientation of the IKONOS II stereo pair and to compute 3D coordinates via photogrammetric intersection. Three approximate models were tested, the rational function - RFM, the Direct Linear Transform - DLT and Affine Project Model - APM. Two rigorous models, denominate position and rotation with 9 and 12 parameters are tested too. Several experiments were performed to evaluate the results from the exterior orientation of the stereo pair, using approximate and rigorous models with six different control point layouts. In addition the 3D coordinates of the 20 check points were determined via the photogrammetric intersection using the adjusted model. In each experiment, using the 3D coordinates of the 20 check-points, the horizontal and vertical accuracies were computed. These values were used to verify the performance of the each model. Statistical tests to evaluate the accuracies of each model were performed. The Cartographic Accuracies Standard (PEC) were used for the tolerances values. The Cartographic Accuracies Standard (PEC) considered a scale map of 1:5000 and the value of the 5 meters for the equidistance between contour lines. The results obtained in the experiments demonstrated that the RFM was the model that produced the best performance because the RFM model required small number of control points to produce horizontal and vertical accuracies similar to tolerable PEC values. However, any of the five tested model can produce similar accuracies when the specific control points layout for each model are used

Keywords: Image Orientation. Spatial Intersection. DLT. APM. RPC. Rigorous Model.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PARTES COMPONENTES DE UM SISTEMA SENSOR .....	22
FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS SENSORES .....	22
FIGURA 3 – ÓRBITA SÍNCRONA COM O SOL ( <i>SUN SYNCHRONOUS</i> ) .....	23
FIGURA 4 – SATÉLITE NOS SENTIDOS ASCENDENTE E DESCENDENTE.....	24
FIGURA 5 – FOV E IFOV .....	25
FIGURA 6 – ÁREA DE IMAGEM IKONOS II NA RESOLUÇÃO ESPACIAL NOMINAL ORIGINAL E REAMOSTRADA COM RESOLUÇÕES SIMULADAS. ....	26
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO SOBRE O IFOV E O <i>PIXEL</i> .....	26
FIGURA 8 – IMAGEM DIGITAL COM DIFERENTES RESOLUÇÕES RADIOMÉTRICAS. (A) 8 BITS E (B) 1 BIT.....	27
FIGURA 9 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E BANDAS ESPECTRAIS DO IKONOS II.....	27
FIGURA 10 – CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES ÓPTICOS PASSIVOS QUE FORMAM IMAGEM.....	28
FIGURA 11 – PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO CCD .....	29
FIGURA 12 – CONFIGURAÇÕES DE CCD LINEARES ( <i>PUSHBROOM</i> ).....	29
FIGURA 13 – DESCRIÇÃO DO PLANO FOCAL DO SENSOR HRC DO CBERS2B.....	30
FIGURA 14 – ESTRUTURA DO ARRANJO LINEAR CCD DA CÂMARA NADIR DO PRISM.....	31
FIGURA 15 – GEOMETRIA DA IMAGEM VERTICAL OBTIDA COM SENSOR <i>PUSHBROOM</i> .....	31
FIGURA 16 – GEOMETRIA DO SENSOR DE VARREDURA LINEAR .....	32
FIGURA 17 – PRINCÍPIO DE EXPOSIÇÃO COM TDI EM TRÊS ESTÁGIOS.....	34
FIGURA 18 – GEOMETRIA DE UMA CÂMARA DIGITAL ( <i>FULL FRAME</i> ) .....	34
FIGURA 19 – GEOMETRIA DE UM SENSOR DE VARREDURA MECÂNICA ( <i>WHISKBROOM SCANNER</i> ) .....	35
FIGURA 20 – DISTORÇÕES EM IMAGENS OBTIDAS COM SENSORES <i>WHISKBROOM</i> .....	36
FIGURA 21 – GEOMETRIA <i>ACROSS-TRACK</i> PARA AQUISIÇÃO DE ESTEREOIMAGENS.....	37
FIGURA 22 – GEOMETRIA <i>ALONG-TRACK</i> PARA AQUISIÇÃO DE ESTEREOIMAGENS.....	38
FIGURA 23 – AQUISIÇÃO SINCRONIZADA (ESQUERDA) E NÃO SINCRONIZADA (DIREITA) .....	39
FIGURA 24 – SISTEMA TRILINEAR PARA ESTEREOIMAGENS: UMALENTE PARA OS TRÊS SENSORES (A) E SISTEMA COM LENTES INDEPENDENTES (B E C) .....	40
FIGURA 25 – ALOS - PRISM .....	40
FIGURA 26 – ORIENTAÇÃO INTERIOR EM FOTOGRAFIAS DIGITAIS .....	42
FIGURA 27 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR NO SENSOR <i>PUSHBROOM</i> .....	42
FIGURA 28 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR SENSOR DE QUADRO (A) E LINEAR (B) .....	44
FIGURA 29 - INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA.....	47
FIGURA 30 – <i>PUSHBROOM SENSOR</i> – SENSOR DE VARREDURA LINEAR.....	49
FIGURA 31 – COLINEARIDADE E GEOMETRIA PARA SENSORES <i>PUSHBROOM</i> .....	50
FIGURA 32 – COMPARAÇÃO ENTRE VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR PARA IMAGEM DE QUADRO E DE SENSORES LINEARES .....	52
FIGURA 33 – PARTE DOS COEFICIENTES RPC'S DE UMA IMAGEM IKONOS II.....	58
FIGURA 34 – INTERSECÇÃO ESPACIAL COM RFM .....	60
FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO DA PROJEÇÃO PARALELA .....	70
FIGURA 36 – INTERPRETAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PARA PRECISÃO PLANIMÉTRICA COM COORDENADAS ISOLADAS (X E Y) OU A COMPOSIÇÃO (XY).....	75
FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL UNIDIMENSIONAL.....	75
FIGURA 38 – SATÉLITE IKONOS II.....	77
FIGURA 39 – PLANO FOCAL DOS SENSORES PAN E MS DO SATÉLITE IKONOS II .....	77
FIGURA 40 – FORMAÇÃO DAS IMAGENS IKONOS II.....	78
FIGURA 41 – CORREÇÃO DO RELEVO PARA IMAGENS <i>GEO</i> -IKONOS II .....	79
FIGURA 42 – ÓRBITA E FORMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS IKONOS II.....	80
FIGURA 43 – ÁREA DE ESTUDO .....	82
FIGURA 44 – PONTOS DO LEVANTAMENTO GPS NA ÁREA DE ESTUDO .....	83
FIGURA 45 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NA IMAGEM 1.....	85
FIGURA 46 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS NA IMAGEM 2.....	85

FIGURA 47 – ESQUEMA DE ATIVIDADES DA METODOLOGIA PROPOSTA .....	87
FIGURA 48 – EXEMPLO DAS BANDAS R, G E B E A COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB-321 .....	89
FIGURA 49 – (A) IMAGEM ORIGINAL E (B) IMAGEM COM AUMENTO LINEAR DE CONTRASTE....	90
FIGURA 50 – EXEMPLO DE PONTOS COLETADOS PARA OS EXPERIMENTOS .....	91
FIGURA 51 – REFERENCIAL DE IMAGEM LEVÓGIRO COM ORIGEM NO CANTO ESQUERDO SUPERIOR DO PRIMEIRO PIXEL .....	92
FIGURA 52 – TRANSFORMAÇÃO ENTRE REFERENCIAL DE IMAGEM PUSHBROOM .....	94
FIGURA 53 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO.....	99
FIGURA 54 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – MR9 .....	105
FIGURA 55 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA MR9.....	107
FIGURA 56 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – MR12 .....	111
FIGURA 57 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA MR12.....	112
FIGURA 58 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – RFM .....	117
FIGURA 59 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA RFM .....	119
FIGURA 60 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – DLT.....	124
FIGURA 61 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA DLT .....	126
FIGURA 62 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA PARA APM DOS 20 PONTOS DE VERIFICAÇÃO.....	132
FIGURA 63 – VETOR DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA APM.....	133
FIGURA 64 – GRÁFICO DE BARRAS DAS MÉDIAS E RMSE PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO APRESENTADOS NA TABELA 30.....	135
FIGURA 65 – PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES DE PONTOS .....	135
FIGURA 66 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR9 .....	138
FIGURA 67 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR9 .....	138
FIGURA 68 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR12 .....	142
FIGURA 69 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR12.....	142
FIGURA 70 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM.....	146
FIGURA 71 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM.....	147
FIGURA 72 – MÉDIA DA DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM UM PONTO DE APOIO .....	148
FIGURA 73 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM UM PONTO DE APOIO .....	148
FIGURA 74 – CONFIGURAÇÕES COM SEIS PONTOS DE APOIO.....	150
FIGURA 75 – MÉDIA DA DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM SEIS PONTOS DE APOIO .....	150
FIGURA 76 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM SEIS PONTOS DE APOIO .....	151
FIGURA 77 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO DLT.....	154
FIGURA 78 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO DLT .....	154
FIGURA 79 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO APM.....	157
FIGURA 80 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO APM .....	157

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DISCREPÂNCIA ENTRE COORDENADAS DE IMAGEM E GPS.....	84
TABELA 2 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – MR9 .....	100
TABELA 3 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO - MODELO MR9.....	101
TABELA 4 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ESTIMADOS – IMAGEM 1 - MR9. ....	102
TABELA 5 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ESTIMADOS - IMAGEM 2 - MR9 . ....	103
TABELA 6 – DISCREPÂNCIAS PLANIALTIMÉTRICAS NA MODELAGEM RIGOROSA MR9 .....	103
TABELA 7– RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA DE 1:5.000 COM MR9 .....	106
TABELA 8 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – MR12 .....	108
TABELA 9 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DO MODELO MR12 .....	109
TABELA 10 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ESTIMADOS - IMAGEM 1- MR12 .....	110
TABELA 11 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ESTIMADOS - IMAGEM 2- MR12 .....	110
TABELA 12 – DISCREPÂNCIAS PLANIALTIMÉTRICAS NA MODELAGEM RIGOROSA MR12 .....	111
TABELA 13 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA DE 1:5.000 COM MR12 .....	112
TABELA 14 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – RFM .....	114
TABELA 15 – DISCREPÂNCIAS PLANIALTIMÉTRICAS COM A RFM.....	115
TABELA 16 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA DE 1:5.000 COM A RFM .....	118
TABELA 17 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – DLT.....	120
TABELA 18 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DO MODELO DLT .....	121
TABELA 19 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 1- DLT .....	122
TABELA 20 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 2- DLT .....	123
TABELA 21 –DISCREPÂNCIAS ENTRE AS COORDENADAS UTILIZANDO-SE A DLT.....	123
TABELA 22 – TESTE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA UMA ESCALA 1:5.000 COM DLT.....	125
TABELA 23 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – APM .....	127
TABELA 24 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DO MODELO APM. ....	128
TABELA 25 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 1- APM.....	129
TABELA 26 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 2- APM.....	130
TABELA 27 – DISCREPÂNCIA ENTRE AS COORDENADAS UTILIZANDO-SE A APM.....	130
TABELA 28 – TESTE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA UMA ESCALA 1:5.000 COM APM.....	132
TABELA 29 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM OS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS.....	134
TABELA 30 – RESULTADOS DAS ANÁLISES PARA O MODELO MR9.....	137
TABELA 31 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA O MR12 .....	141
TABELA 32 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 1- MR12 – PARA A CONFIGURACAO (E) DE PONTOS DE APOIO.....	141
TABELA 33 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 2- MR12 - PARA A CONFIGURACAO (E) DE PONTOS DE APOIO.....	142
TABELA 34 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA DISCREPÂNCIA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO COM A RFM.....	144
TABELA 35 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA DISCREPÂNCIA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO COM A DLT.....	152
TABELA 36 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA DISCREPÂNCIA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO COM A APM.....	155

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DIFERENTES POLINÔMIOS PARA MODELAGEM RIGOROSA -----	54
QUADRO 2 – MODELOS RIGOROSOS COM 12 E 8 PARÂMETROS -----	54
QUADRO 3 – PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA - PEC -----	72
QUADRO 4 – PRODUTOS IKONOS COMERCIALIZADOS ( <i>SINGLE IMAGE</i> )-----	79
QUADRO 5 – PRODUTOS ESTEREOPAR IKONOS -----	79
QUADRO 6 – ESPECIFICAÇÕES DO SATÉLITE IKONOS II-----	80
QUADRO 7 – DADOS DAS IMAGENS IKONOS II.-----	82
QUADRO 8 – MODELO RIGOROSOS UTILIZADOS -----	96

## LISTA DE SIGLAS

ASPRS	- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
APM	- Affine Projection Model
CBERS	- China-Brazil Earth-Resources Satellite
CCD	- Charge Coupled Device
CNES	- Centre National d'Etudes Spatiales
CP	- Centro de Projeção
DLT	- Direct Linear Transformation
DSG	- Diretoria de Serviços Geográficos
EROS	- Earth Remote Observation Satellite
ETM	- Enhanced Thematic Mapper
FOV	- Field of View
GPS	- Sistema de Posicionamento por Satélite
GSD	- Ground Sample Distance
HRC	- High Resolution Camera
HRSI	- High Resolution Satellite Image
IAI	- Israel Aircraft Industries
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFOV	- Instantaneous Field Of View
INCRA	- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISRO	- Indian Space Research Organization
MDT	- Modelo Digital do Terreno
MR	- Modelagem Rigorosa
MR1	- Modelagem Rigorosa com 12 parâmetros
MR2	- Modelagem Rigorosa com 9 parâmetros
MVC	- Matriz Variância-Covariância
PDI	- Processamento Digital de Imagens
POE	- Parâmetros de Orientação Exterior
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RPC	- Rational Polynomial Coefficients
RTK	- Real Time Kinematic
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPOT	- Satellite pour l'Observation de la Terre
TDI	- Time Delay Integration
UTM	- Universal Transversa de Mercator

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.2.1 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>21</b>
2.1 SISTEMA DE SENSORES ORBITAIS	21
2.1.1 Órbitas dos satélites para imagens de alta resolução	23
2.1.2 Características das imagens orbitais	24
2.1.3 Características dos sistemas sensores passivos que formam imagem	28
2.1.3.1. Sensor de varredura linear ( <i>Pushbroom</i> )	29
2.1.3.1.1. Princípio de funcionamento	31
2.1.3.2. Sensores de quadro ( <i>Full frame</i> )	34
2.1.3.3. Sensor de varredura mecânica ( <i>Whiskbroom</i> )	35
2.1.4 Aquisição de estereogramas orbitais	37
2.2 PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO EM IMAGENS ORBITAIS	41
2.2.1 Orientação Interior	41
2.2.2 Orientação Exterior	43
2.2.3 Intersecção Espacial	46
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES <i>PUSHBROOM</i>	47
2.3.1 Modelos rigorosos	48
2.3.2 Modelos aproximados (não-rigorosos)	55
2.3.2.1. Modelo de Função Racional (RFM)	56
2.3.2.1.1. Pré-refinamento com modelo RFM (RPC)	60
2.3.2.2. Transformação Linear Direta (DLT)	64
2.3.2.3. Modelo de projeção paralela - APM	68
2.4 CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	70
2.4.1 Análise de tendência	71
2.4.2 Análise de precisão	73
2.5 PLATAFORMA IKONOS II PARA AQUISIÇÃO DE ESTEREOIMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO	76
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>82</b>
3.1 IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO	82
3.2 EQUIPAMENTOS E RECURSOS UTILIZADOS	86
3.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS	86
3.3.1 Dados de entrada	88
3.3.2 Pré-Processamento das Imagens	88
3.3.3 Levantamento de campo	90
3.3.4 Medida de pontos na imagem	91
3.3.4.1. Transformação entre referenciais de imagem	92
3.3.5 Processamentos e análises de resultados	94
3.3.5.1. Adequação do modelo	95
3.3.5.2. Estudo de configuração de pontos de apoio	96

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>98</b>
4.1 ADEQUAÇÃO DE MODELOS	98
4.1.1 MR1 – Modelagem rigorosa com 9 parâmetros	99
4.1.2 MR12 – Modelagem Rigorosa com 12 parâmetros	108
4.1.3 Modelo de Função Racional - RFM	113
4.1.4 Transformação Linear Direta - DLT	119
4.1.5 APM	126
4.1.6 Comparação de resultados obtidos com os modelos MR9, MR12, RFM, DLT e APM	133
4.2 ESTUDO DE CONFIGURAÇÃO DE PONTOS DE APOIO	135
4.2.1 Experimentos com modelagem rigorosa com nove parâmetros – MR9	137
4.2.2 Experimentos com modelagem rigorosa com doze parâmetros – MR12	139
4.2.3 Experimentos com a RFM	144
4.2.4 Experimento com modelagem matemática DLT	151
4.2.5 Experimento com modelo matemático APM	154
4.2.6 Conclusões obtidas nos experimentos	157
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>160</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	160
5.2 RECOMENDAÇÕES	163
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>165</b>
ANEXO A	171
ANEXO B	177

## 1 INTRODUÇÃO

As imagens de satélite de alta resolução (HRSI – *High Resolution Satellite Images*) estão cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas e com aplicações nas mais diversas áreas de conhecimento. Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto, juntamente com as técnicas de Fotogrametria, vem contribuindo significativamente com pesquisas aplicadas para a geração de produtos cartográficos de alta qualidade, que até bem pouco tempo eram realizados apenas com a utilização de fotografias aéreas convencionais.

Nos dias atuais é possível dispor de HRSI com características das mais variadas principalmente, no que diz respeito ao elemento de resolução no terreno (GSD - *Ground Sample Distance*), como por exemplo, imagens pancromáticas SPOT 5 com GSD de 2,5 m, IKONOS II com resolução espacial nominal de um metro e GEOEYE com GSD de 0,45 m.

Quando se compara as imagens orbitais de alta resolução com as fotografias aéreas é possível apresentar algumas vantagens da primeira em relação à segunda, como por exemplo, a cobertura de grandes áreas e a redundância de informações sobre uma mesma área que contribui significativamente em trabalhos ou pesquisas que envolvam análises temporais. Por outro lado é possível verificar que os sistemas atuais para obtenção de HRSI não substituem as fotografias aéreas no que se refere à grande resolução espacial (GSD próximo de 0,2 m). No entanto, basta analisar o histórico do avanço tecnológico ocorrido nos sistemas sensores nessa última década para prever que na próxima década seja possível obter HRSI com resolução espacial próxima da obtida com as fotografias aéreas.

Apesar da superfície física da Terra estar totalmente mapeada em escala pequena (carta do mundo ao milionésimo), em muitas regiões do planeta não é possível dispor de mapas em escalas grandes, tais como na escala de 1:10.000, 1:5.000 ou maiores. Esses mapas em escalas grandes servem como importante



ferramenta nas atividades voltadas ao gerenciamento do espaço urbano. No Brasil, a situação encontrada para os mapas não é muito diferente do que foi mencionado, onde a escassez e a falta de atualização da base de dados existente são problemas a serem contornados. Nesse contexto cabe ressaltar a importância de estudos que envolvam a aplicação de HRSI na geração de produtos cartográficos de alta qualidade.

Assim como a Fotogrametria, que utiliza modelos estereoscópicos no processo de restituição fotogramétrica visando a obtenção de mapas planialtimétricos, é possível utilizar estereoidimagens orbitais para a mesma finalidade. No entanto, para que seja possível obter informações fidedignas a partir dessas imagens torna-se necessário o conhecimento de parâmetros que recuperam a geometria da imagem no instante da aquisição e de outros que orientam e posicionam a imagem num dado referencial geodésico ou cartográfico.

A obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos com base no estéreo par está fundamentada na intersecção de dois raios de luz e na condição clássica da Fotogrametria, que estabelece a colinearidade entre o ponto imagem, ponto objeto e centro de projeção. Tendo o par estereoscópico devidamente orientado, as medidas de pontos homólogos dão origem a um sistema de quatro equações que através de um ajustamento por mínimos quadrados determina as coordenadas tridimensionais do ponto.

Neste contexto, os modelos matemáticos utilizados podem ser divididos em aproximados e rigorosos. Os modelos aproximados são os mais utilizados, pois não necessitam do conhecimento de parâmetros do sensor para a orientação do modelo e possuem facilidades nas aplicações, devido ao relacionamento direto das coordenadas de imagem com suas respectivas coordenadas de terreno. Os principais exemplos são modelos matemáticos como a Transformação Linear Direta (DLT), a Projeção Paralela (APM) e razão de polinômios (*Rational Function Model* – RFM). Já os modelos rigorosos são aqueles que levam em conta a forma de

aquisição da cena e os parâmetros físicos do sensor e estão fundamentados no uso da equação de colinearidade.

A utilização de modelos aproximados na orientação de um par estereoscópico e determinação de coordenadas tridimensionais são apresentados em vários trabalhos científicos como os de Savopol e Armenakis (1998), Valadan Zoej e Petrie (1998), Fraser, Hanley e Yamakawa (2001, 2002) e Valadan Zoej e Sadeghian (2003). Em geral os resultados apresentados confirmam a possibilidade de geração de produtos com precisões compatíveis com a resolução espacial das imagens utilizadas. Igualmente, podem ser mencionados a utilização de modelos rigorosos em diversos trabalhos científicos, tais como os de Guran e Dowman (1988), Orun e Natarajan (1994) que consideram os parâmetros de posição e atitude do satélite no momento de aquisição das imagens e são conhecidos como sendo o primeiro modelo rigoroso desenvolvido para sensores do tipo *pushbroom*.

Atualmente, as imagens orbitais de alta resolução podem ser obtidas de diferentes sensores, resoluções e correções geométricas, ocasionando dificuldades para a definição do modelo matemático mais apropriado para a orientação do par estereoscópico com a finalidade de extração de informação tridimensionais. Associado ainda, com as propriedades descritas da imagem tem-se também a definição da melhor configuração geométrica de pontos de apoio a ser utilizada no processo. Nesse sentido, verifica-se a importância da realização de pesquisas dentro dessa temática. Por exemplo, Jacobsen (2007) verificou que para imagens IKONOS II, corrigidas e reamostradas num sistema de projeção cartográfica, a utilização de RFM e o emprego de um único ponto de apoio foi suficiente para a obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos com exatidão planimétrica de um pixel. Entretanto, para imagens QUICKBIRD a obtenção de mesma exatidão planimétrica, somente foi possível com a configuração mínima de quatro pontos de apoio. Por outro lado, nem sempre os parâmetros do modelo RFM são disponíveis para o usuário final, tendo em vista o maior custo envolvido na aquisição desse tipo

de imagem e ainda, a utilização de modelos rigorosos devem ser sempre direcionados para orientação de pares estereoscópicos sem correções geométricas?

Com base no que foi exposto, o presente trabalho de pesquisa tem como proposta o estudo experimental que possibilite avaliar modelos aproximados e rigorosos e configurações geométricas de pontos de apoio necessárias para a orientação exterior de um par estereoscópico para fins de determinação de coordenadas tridimensionais de pontos, empregando imagens de alta resolução (IKONOS II – *Stereo Reference*).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo experimental que permita analisar o desempenho de modelos matemáticos aproximados e rigorosos para orientar um par de estereoidimagens de alta resolução IKONOS II e determinar coordenadas tridimensionais pelo processo de intersecção espacial.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

(1) Estudar e detalhar os modelos matemáticos aproximados e rigorosos mais utilizados para a extração de coordenadas tridimensionais de pontos a partir de estereoidimagens orbitais;

(2) Desenvolver e implementar os aplicativos computacionais necessários para a orientação exterior de um par estereoscópico com os modelos matemáticos

propostos bem como os aplicativos para a geração das coordenadas tridimensionais de pontos homólogos, pelo processo de intersecção espacial;

(3) Estudar e apresentar a quantidade e a melhor distribuição dos pontos de apoio para a orientação do par e determinação de coordenadas tridimensionais de pontos com diferentes modelos matemáticos utilizados;

(4) Avaliar as exatidões planimétricas e altimétricas obtidas para as coordenadas dos pontos de verificação, conforme estabelecido pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional - Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de imagens orbitais na extração de informações cartográficas da superfície terrestre tornou-se possível com o lançamento do primeiro satélite do Sistema LANDSAT, há pouco mais de duas décadas. Entretanto, a grande maioria das aplicações de mapeamento era realizada a partir dos produtos advindos de forma analógica.

Com o passar dos anos houve um crescente avanço tecnológico e a partir dos anos 80 foi possível adquirir imagens orbitais em formato digital e com elemento de resolução espacial de alguns metros. Fica claro o crescente desenvolvimento de sensores de alta resolução ocorrido nos últimos anos e, conseqüentemente, uma tendência na continuidade desse crescimento tecnológico, propiciando geração de imagens da superfície terrestre cada vez mais detalhadas.

Algumas das vantagens já descritas sobre as imagens orbitais em relação às imagens aéreas, demonstram uma tendência maior na utilização desses tipos de imagem em projetos de mapeamento cartográfico. Neste contexto, tem-se a determinação de informações tridimensionais com base na intersecção espacial com a utilização de um par estereoscópico. Como já mencionado, o conhecimento tecnológico dessa temática é imprescindível para a obtenção de informações dentro

das exatidões requeridas, tendo em vista diferentes metodologias que podem ser empregadas no processo.

Apesar do estado avançado de pesquisas em nível internacional envolvendo estereogramas orbitais, a grande maioria das aplicações são voltadas para análises de precisões planimétricas. Além disso a relevância da investigação e uso de modelos aproximados e também de modelos matemáticos mais complexos e que levam em consideração análises de precisões tridimensionais, levando em conta questões relacionadas à variação do relevo, são de extrema importância devendo ser mais bem estudadas e exploradas, uma vez que trabalhos dessa natureza podem servir de importante ferramenta na geração e também atualização de bases cartográficas em território nacional. Sabe-se que no Brasil pouco se tem feito nessa área, justificando a realização de pesquisas nesse assunto, o que contribuirá para o desenvolvimento tecnológico e de formação de recursos humanos.

#### 1.2.1 ESTRUTURA DO TRABALHO.

Foi apresentada na introdução a importância da realização da pesquisa proposta visando o desenvolvimento tecnológico e formação de recursos humanos nessa área de conhecimento no País, os objetivos e as justificativas.

A revisão de literatura descreve os elementos importantes para a orientação de imagens orbitais com os diferentes modelos matemáticos e extração de informações tridimensionais. Em seguida, será apresentada a metodologia a ser empregada para a realização do estudo experimental proposto, relacionando o conjunto com os recursos necessários. Finalmente, efetua-se a análise e discussões dos resultados e no final as conclusões e recomendações de continuidade de pesquisas relacionadas são apresentadas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SISTEMA DE SENSORES ORBITAIS

O crescente aumento na geração de novos tipos de sensores vem contribuindo para diversas pesquisas na área de Fotogrametria e de Sensoriamento Remoto, principalmente no que se refere ao mapeamento e à atualização de bases cartográficas. Os produtos provenientes de aerolevantamentos ou imagens orbitais, normalmente servem a uma quantidade muito grande de usuários já que hoje é quase impossível falar, por exemplo, de planejamento urbano, gerenciamento do espaço e outras atividades que envolvam dados espaciais, sem a utilização de mapas ou ortoimagens.

As plataformas orbitais voltadas para a aquisição de imagens da superfície terrestre possui uma grande gama de tipos de sensores e também diferentes tecnologias para o processo de obtenção de informações provenientes da superfície terrestres. O sistema sensor que equipa a grande maioria das plataformas para obtenção de HRSI é composto basicamente por um coletor, geralmente formado pelo sistema óptico (lentes e filtros), um detector (ex: *Charge Coupled Device* “CCD”) e um processador, como pode ser visto na Figura 1.

Moreira (2011) define os sistemas sensores como dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro e gerar informações que possam ser transformadas em dados passíveis de interpretação, tanto na forma de imagem quanto na forma gráfica ou de tabelas.

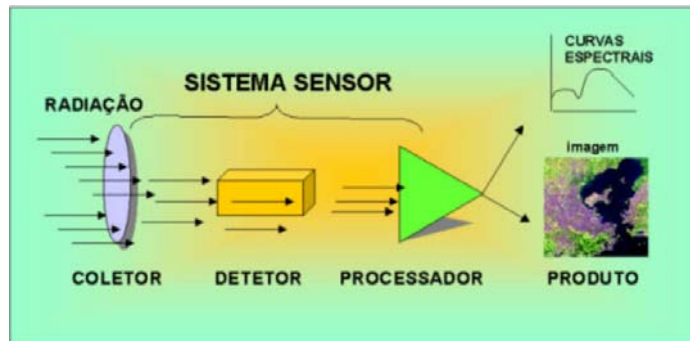


FIGURA 1 – PARTES COMPONENTES DE UM SISTEMA SENSOR  
 FONTE: Moreira (2003)

Atualmente, a grande gama de sensores orbitais possibilita a obtenção de imagens com características e particularidades próprias, que podem atender demandas tanto para pesquisas meteorológicas como para operações de mapeamento. Os sistemas sensores podem ser classificados, conforme pode-se observar na Figura 2, em ativos ou passivos (no que se refere à fonte de radiação). Os passivos são subdivididos em não-varredura (fotográficos) e de varredura (*pushbroom*) sendo esses últimos os que operam na grande maioria das plataformas para aquisição de HRSI.

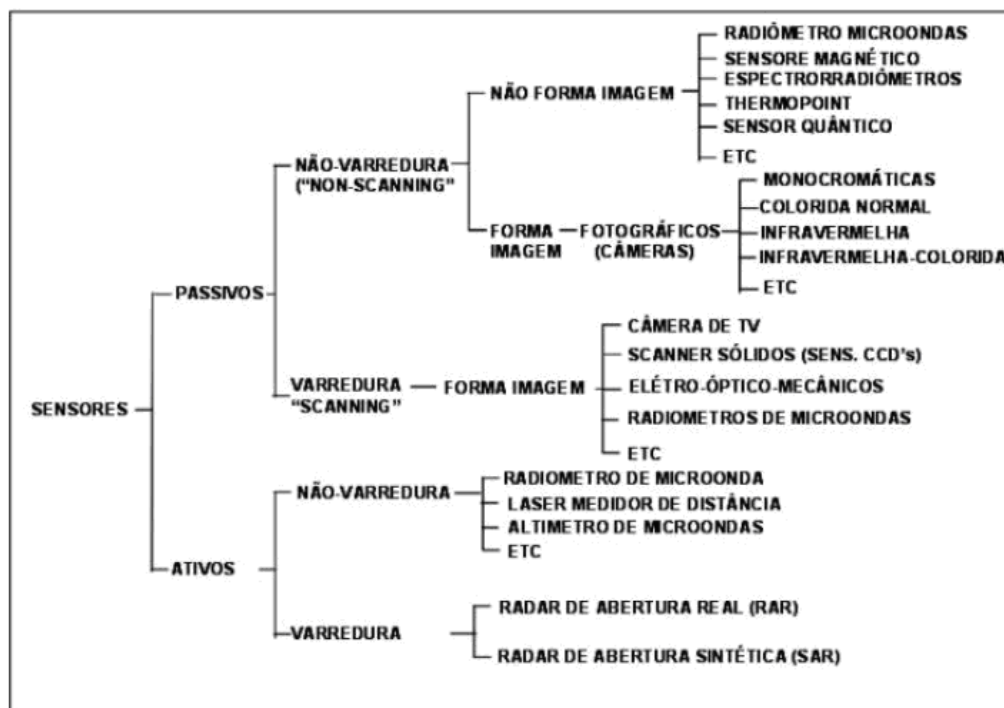


FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS SENSORES  
 FONTE: Adaptado de Poli (2005)

### 2.1.1 Órbitas dos satélites para imagens de alta resolução

A definição da órbita de um satélite para operar com sensores que produzem imagens é realizada pela combinação de parâmetros, tais como: tipo de sensor (ativo ou passivo), condição de iluminação, área a ser coberta, período de revisita, distância satélite-Terra, entre outros.

As órbitas mais utilizadas para obtenção de HRSI são aquelas chamadas de baixas (entre 300 km e 1000 km), escolhidas de forma a se obter um *pixel* no terreno com elemento de resolução constante. O satélite Quickbird é um desses exemplos e opera em uma órbita de, aproximadamente, 450 km de altitude capturando imagens com elemento de resolução inferior a 1,0 m.

As condições de iluminação são fundamentais para a definição do tipo de órbita do satélite. As órbitas síncronas com o sol são as mais utilizadas para se obter imagens com características semelhantes de iluminação. Trata-se de uma órbita quase polar ( $\sim 98^\circ$  de inclinação com o plano do equador – FIGURA 3), que garante uma cobertura de praticamente toda superfície da Terra e com vantagem de passagem nas latitudes sempre nos mesmos horários.

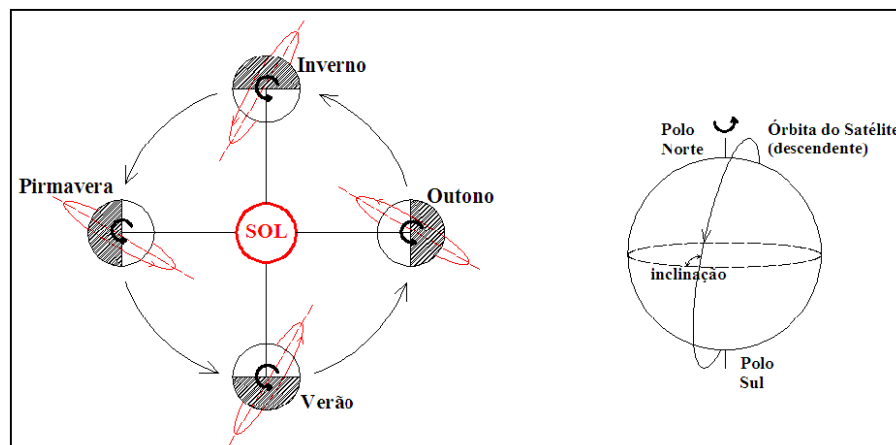


FIGURA 3 – ÓRBITA SÍNCRONA COM O SOL (SUN SYNCHRONOUS)

FONTE: Adaptado de [www.eorc.jaxa.jp/.../satellit\\_type\\_orbit\\_e.html](http://www.eorc.jaxa.jp/.../satellit_type_orbit_e.html)

O sincronismo entre o movimento da plataforma com as condições de iluminação solar é fundamental no processo de registro da cena, visto que a grande maioria das HRSI são obtidas a partir de sensores passivos.



Em relação à Terra, pode-se dizer que o satélite se move em duas direções, uma no sentido Sul-Norte e outra no sentido Norte-Sul. São as passagens conhecidas como ascendente e descendente, respectivamente, conforme pode-se observar na Figura 4. No caso dos satélites que operam com órbitas síncronas com o sol, a passagem no modo ascendente ocorre na face sombreada da Terra enquanto que a passagem descendente ocorre em sincronismo com o sol.

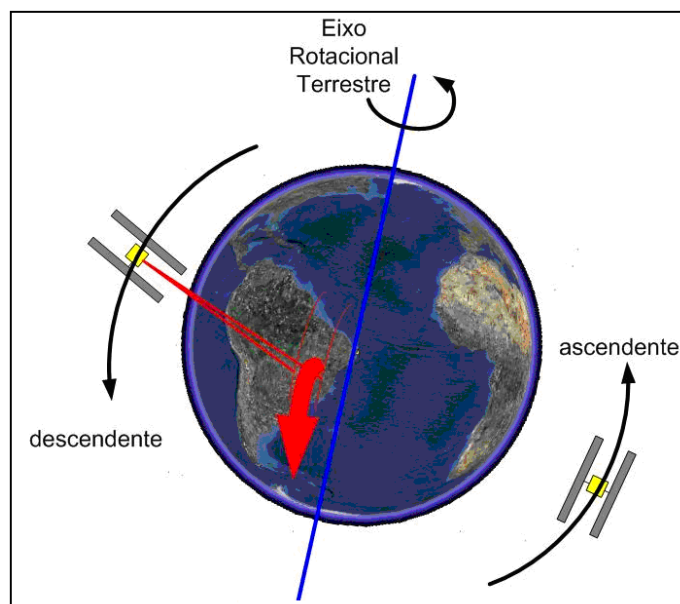


FIGURA 4 – SATÉLITE NOS SENTIDOS ASCENDENTE E DESCENDENTE  
FONTE: O autor (2011)

### 2.1.2 Características das imagens orbitais

As imagens de satélite possuem quatro diferentes tipos de resoluções: a resolução espacial, a resolução radiométrica, a resolução espectral e a resolução temporal.

Quando o objetivo é trabalhar com imagens de satélite para geração de produtos cartográficos, a resolução espacial de um determinado sensor é a principal resolução a ser considerada e refere-se à habilidade do sensor em discriminar e distinguir alvos na superfície imageada. Esta habilidade baseia-se na projeção da área do detector sobre a superfície terrestre, definindo a região no terreno a ser capturada pelo sistema sensor, que é dependente do campo de visada e altitude da

plataforma.

O instrumento sensor coleta informações de um objeto ou fenômeno dentro do campo de visada instantâneo (*Field Of View* - FOV) que é o ângulo de visada geral do sensor sobre a superfície terrestre, conforme mostrado na Figura 5. Já o campo de visada de cada elemento sensor é chamado de IFOV (*Instantaneous Field Of View*) e define a menor área no terreno a ser registrada. Muitos sistemas sensores usam ópticas com IFOV constante, e a resolução espacial nominal desses sistemas é definida como sendo a dimensão em metros do IFOV projetado no terreno (JENSEN, 2009).

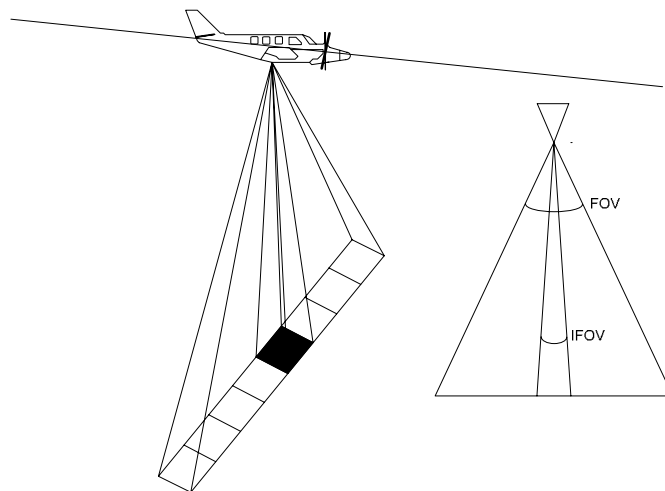


FIGURA 5 – FOV E IFOV  
FONTE: Adaptado de Poli (2005)

Diferentes tipos de sensores são descritos segundo sua resolução espacial nominal que pode ser, por exemplo, de 30 x 30 m, 20 x 20 m, 10 x 10 m, 5 x 5 m, 1 x 1 m, entre outras. O sensor *Thematic Mapper plus* (TM+), à bordo do satélite Landsat 7 por exemplo, define uma resolução espacial nominal no terreno de 15 x 15 m para a banda pancromática, enquanto que o sensor CCD do IKONOS II obtém imagens com resolução espacial nominal de 1 x 1 m para a banda pancromática.

A Figura 6 mostra uma pequena área de uma imagem do sensor CCD IKONOS II com resolução espacial nominal variando de 1 x 1 m a 10 x 10m.

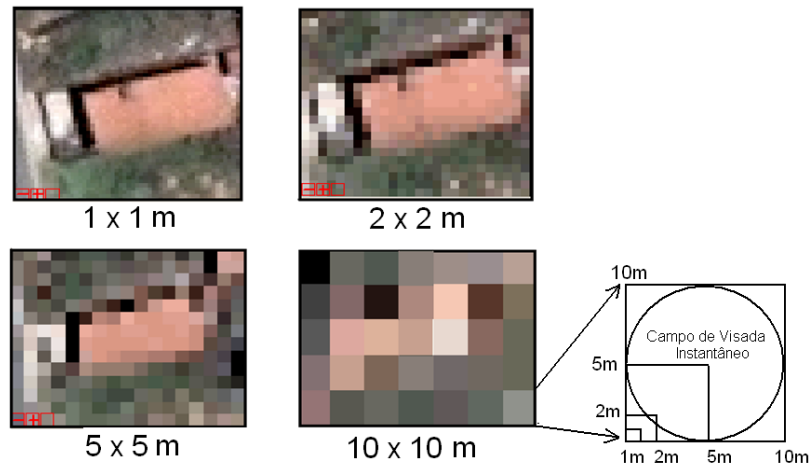


FIGURA 6 – ÁREA DE IMAGEM IKONOS II NA RESOLUÇÃO ESPACIAL NOMINAL ORIGINAL E REAMOSTRADA COM RESOLUÇÕES SIMULADAS.  
FONTE: O autor (2011)

A partir da Figura 7 é possível observar que os diferentes elementos presentes na área da circunferência (IFOV) contribuem com o valor da reflectância no pixel da imagem.

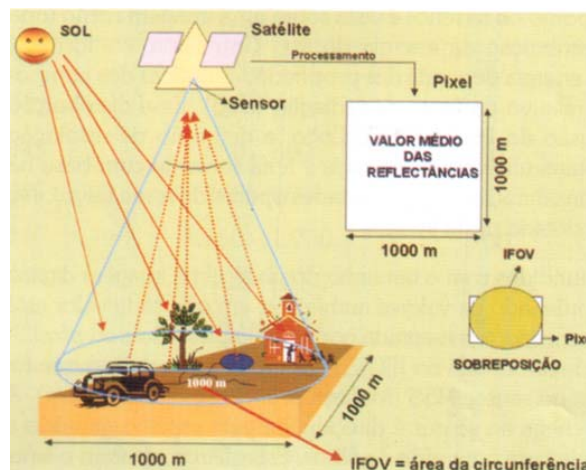


FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO SOBRE O IFOV E O PIXEL  
FONTE: Moreira (2003)

Conforme descrito por Jensen (2009), a resolução radiométrica é definida como sendo a capacidade (sensibilidade) de um detector de sensoriamento remoto em capturar a diferença na potência do sinal à medida que ele registra o fluxo radiante refletido, emitido ou retroespalhado pelo terreno. Essa resolução define o número de níveis de sinal claramente discriminados. Uma alta resolução radiométrica, geralmente, aumenta a probabilidade de que os fenômenos sejam avaliados com mais exatidão pelo Sensoriamento Remoto. A resolução radiométrica refere-se portanto à diferença mínima de energia que o sensor é capaz de

discriminar, atribuindo desde o tom mais escuro ao tom mais claro e que é expressa pelo número de bits utilizados para quantificar o *pixel*. Verifica-se na Figura 8 um exemplo de duas imagens com diferentes resoluções radiométricas, sendo a primeira de 8 bits ( $2^8=256$  níveis de cinza) e a segunda de 1 bit ( $2^1=2$  níveis, preto e branco).

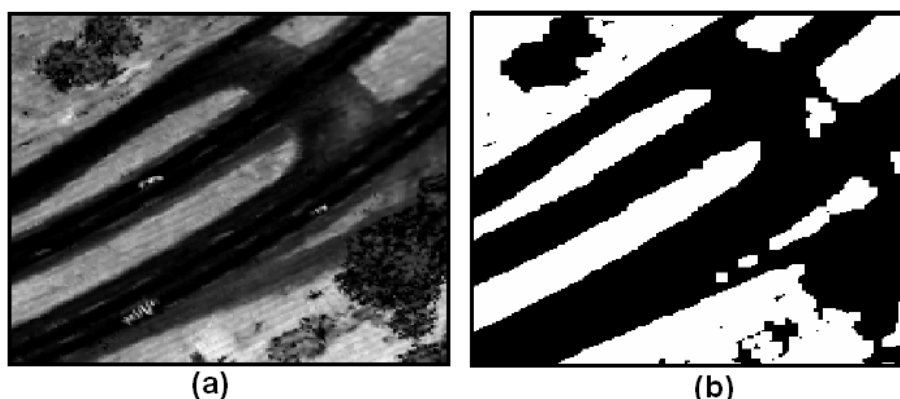


FIGURA 8 – IMAGEM DIGITAL COM DIFERENTES RESOLUÇÕES RADIOMÉTRICAS. (A) 8 BITS E (B) 1 BIT  
FONTE: O autor (2011)

A resolução espectral está associada, de acordo com Jensen (2009), com o número e a dimensão (tamanho) de intervalos de comprimento de onda (chamados de bandas ou canais) no espectro eletromagnético (FIGURA 9) que um instrumento de Sensoriamento Remoto é sensível. Aos sensores que operam em mais de um intervalo de comprimento de onda dá-se o nome de sensores multiespectrais.

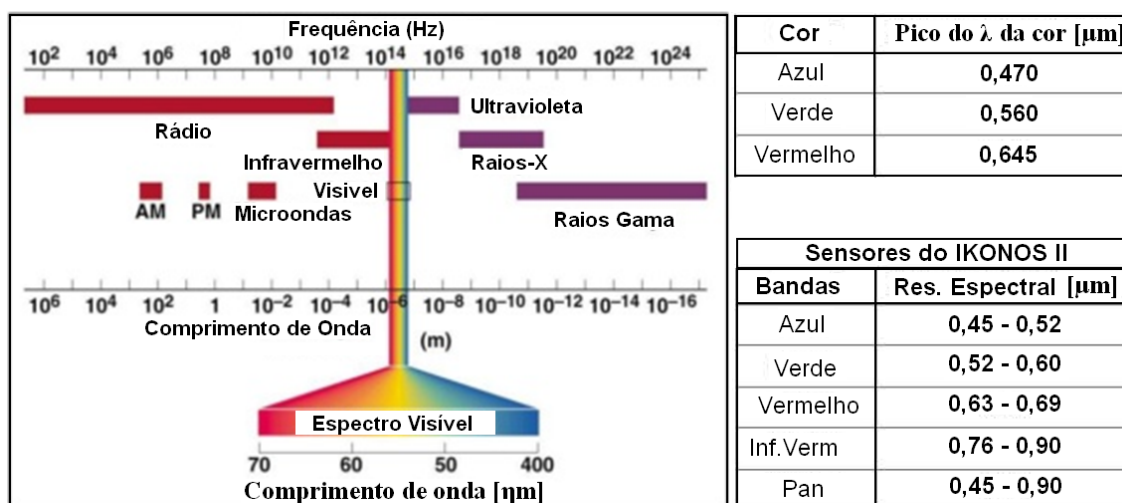


FIGURA 9 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E BANDAS ESPECTRAIS DO IKONOS II  
FONTE: Adaptado de Giannone (2006)

A resolução temporal refere-se à frequência de imageamento de uma mesma região, ou seja, é o intervalo de tempo que o satélite leva para poder gerar uma nova imagem de uma mesma área. As plataformas orbitais e seus sensores podem operar, na obtenção de imagens, com a visada do sensor direcionada tanto para a posição do nadir quanto fora dele. Este último modo de operação permite que o período de revisita seja consideravelmente reduzido.

Maiores detalhes sobre os tipos de resoluções, tratados em Sensoriamento Remoto, além das principais plataformas orbitais que operam com sensores multiespectrais e hiperespectrais podem ser vistos em Richards e Jia (2005), Jensen (2009), Novo (2010), Moreira (2011), entre outros.

### 2.1.3 Características dos sistemas sensores passivos que formam imagem

Verifica-se na Figura 10 a classificação dos três principais tipos de sensores passivos que formam imagens digitais. O sensor pontual (*wisckbroom*) opera com um único sensor fotoelétrico acoplado a um sistema eletro-óptico-mecânico enquanto que o sensor linear (*pushbroom*) e o de quadro (*full-frame*) operam com “detectores de carga acoplada” ou *Charge Coupled Device* (CCD). Apesar dos diferentes tipos de configurações de sensores que operam com base em tecnologia CCD, o princípio básico de funcionamento e geração de imagem a partir de sensores desse tipo é basicamente o mesmo.

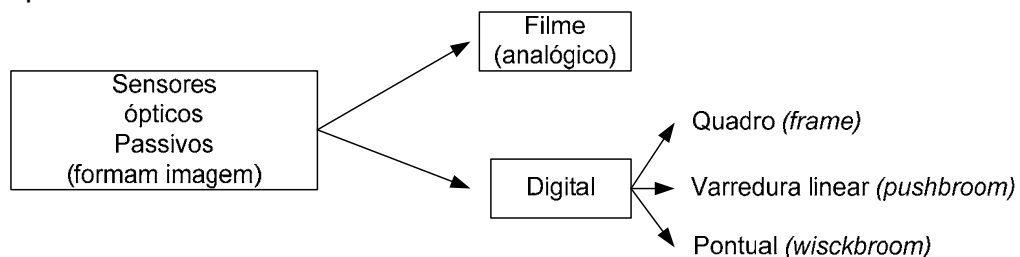


FIGURA 10 – CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES ÓPTICOS PASSIVOS QUE FORMAM IMAGEM  
FONTE: Adaptado de Poli (2005)

O elemento sensor (CCD) é exposto à radiação eletromagnética proveniente dos alvos, gerando carga elétrica que é, posteriormente, amplificada para,

finalmente, ser convertida de sinal analógico para digital, conforme expresso na Figura 11.



FIGURA 11 – PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO CCD  
FONTE: Adaptado de Schenk (1999)

#### 2.1.3.1. Sensor de varredura linear (*Pushbroom*)

De acordo Poli (2005), algumas configurações com arranjos lineares de sensores CCD são possíveis, conforme pode-se observar na Figura 12. Enquanto alguns sensores *pushbroom* operam com uma única linha de sensores CCD (Figura 12 a) existem configurações que utilizam mais de um arranjo linear, podendo estar alinhado (em série, FIGURA 12b), associado em paralelo (FIGURA 12c) ou em uma combinação dessas duas (FIGURA 12d).

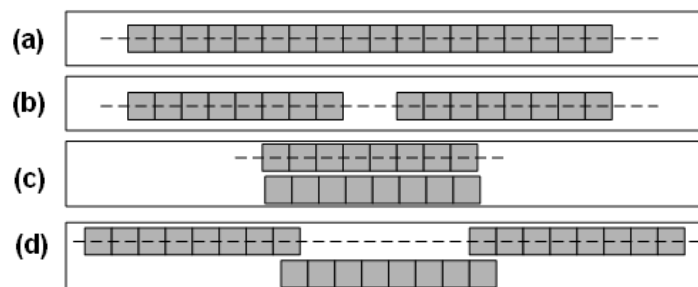


FIGURA 12 – CONFIGURAÇÕES DE CCD LINEARES (PUSHBROOM)  
FONTE: Poli (2005)

O primeiro satélite a operar com sensores do tipo *pushbroom* foi o SPOT, lançado em 1986. O arranjo linear de sensores CCD's era composto de 6000 detectores e permitia a coleta de imagens pancromáticas com resolução espacial nominal de 10 x 10 metros. As cenas comercializadas eram disponibilizadas com dimensões de 6000 x 6000 *pixels*, obtidas a partir de um ângulo de visada de 4,2°, o que gerava uma varredura no terreno de, aproximadamente, 60 km.

Após o sucesso do SPOT, grande parte dos sensores orbitais para HRSI foram lançados com ópticas e sensores do mesmo tipo, porém com geometria interna diferenciada (principalmente nas configurações “b e d” da Figura 12). Por exemplo, o satélite indiano IRS opera com três segmentos de sensores CCDs (chamado CCD1, CCD2 e CCD3), cada um com 4096 detectores. A sobreposição entre CCD1 e CCD2 é de 243 pixel's e entre o CCD2 e CCD3 é de 152 pixels (POLI, 2005).

Outro exemplo de arranjo similar ao do satélite IRS é o arranjo de CCD's (HRC) que equipava o satélite CBERS 2B, conforme pode-se verificar na Figura 13.

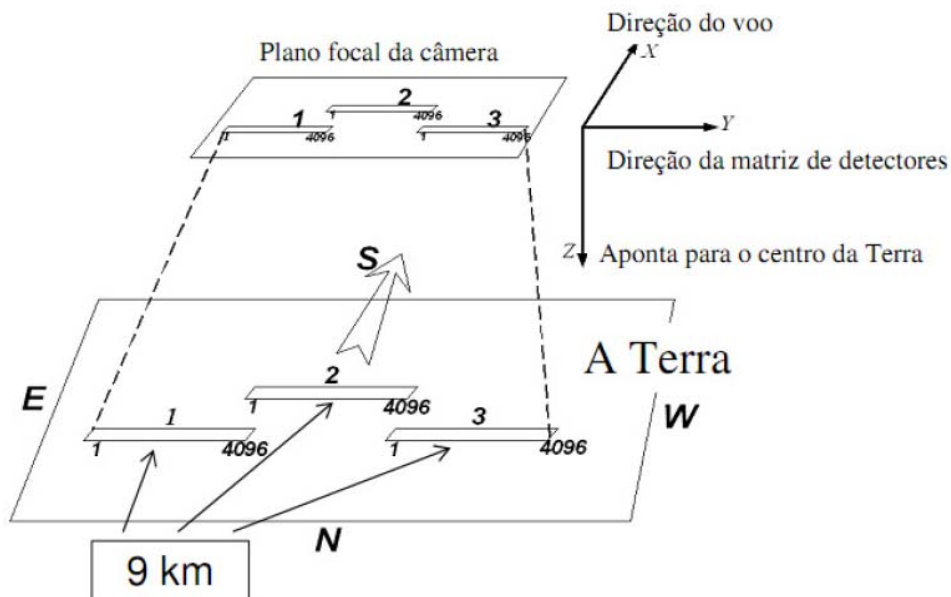


FIGURA 13 – DESCRIÇÃO DO PLANO FOCAL DO SENSOR HRC DO CBERS2B  
FONTE: Epiphany (2009)

O Satélite ALOS também opera com uma série de sensores lineares (PRISM). Segundo Kocaman e Gruen (2008), a estrutura do sistema de varredura nadiral desse sistema sensor é composta por seis chips CCD, cada um contendo 4960 elementos detectores, enquanto que a câmara que “fotografa” para trás (backward) e para frente (forward) é composta por oito chips CCD. Quando são escolhidas áreas com largura de 35km no terreno, as imagens geradas pelo PRISM utilizam apenas quatro chips de CCD's (FIGURA 14).

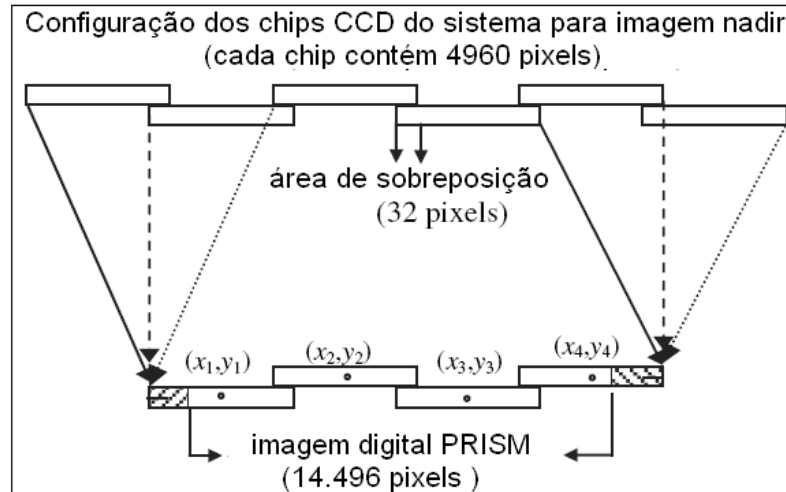


FIGURA 14 – ESTRUTURA DO ARRANJO LINEAR CCD DA CÂMARA NADIR DO PRISM  
FONTE: Kocaman e Gruen (2008)

#### 2.1.3.1.1. Princípio de funcionamento

Uma imagem obtida a partir de sensor do tipo *pushbroom*, corresponde a um único registro da superfície, num instante particular de tempo “t”, conseqüentemente, a partir de um único centro perspectivo, enquanto que uma “cena” corresponde ao conjunto das “n” linhas (imagens) consecutivas. Verifica-se na Figura 15 a geometria de uma imagem vertical obtida a partir de sensores *pushbroom*, onde é possível observar que o sensor, acoplado no plano focal do sistema, registra a imagem na direção perpendicular ao deslocamento do satélite na órbita.

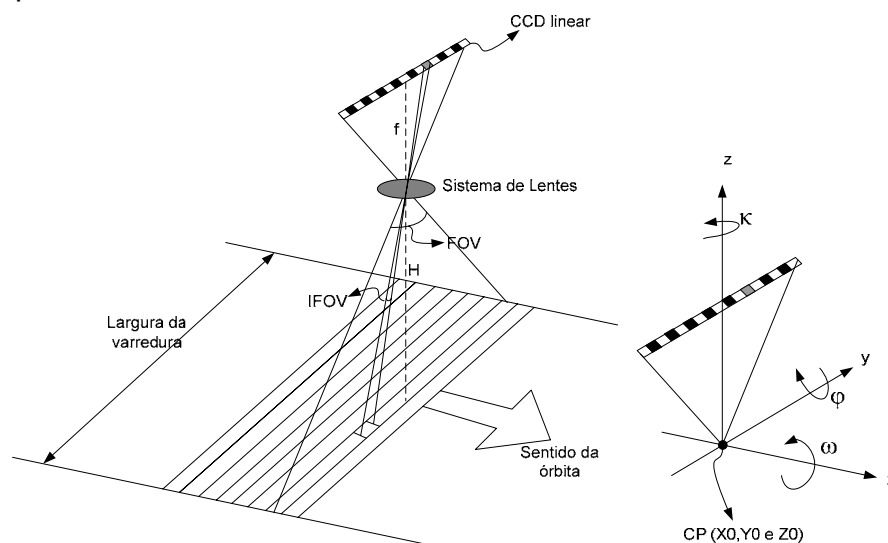


FIGURA 15 – GEOMETRIA DA IMAGEM VERTICAL OBTIDA COM SENSOR *PUSHBROOM*  
FONTE: Adaptado de Zhang (2005)



Verifica-se na Figura 16 que a diferença no tempo de aquisição das linhas implica em diferentes parâmetros de orientação (posição e atitude) para cada linha que forma a cena, diferente do que ocorre no sensor de quadro.

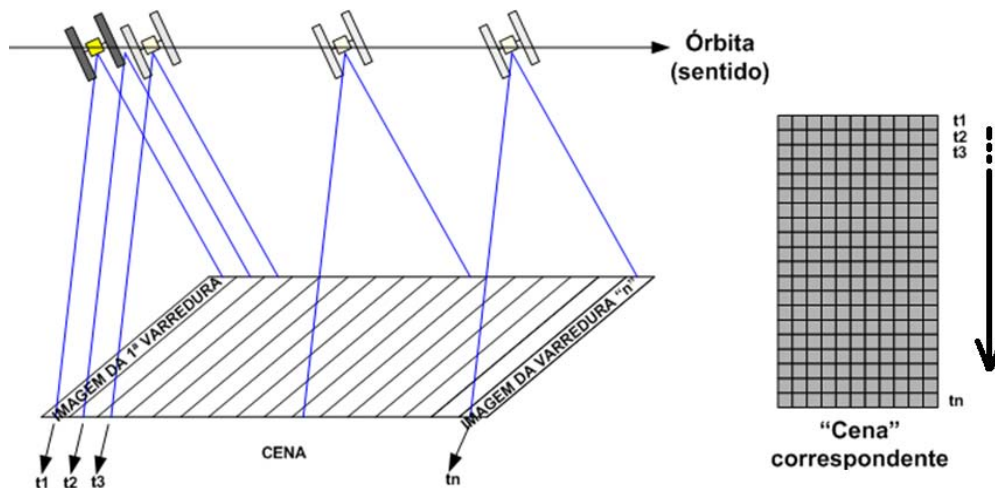


FIGURA 16 – GEOMETRIA DO SENSOR DE VARREDURA LINEAR

FONTE: adaptado de Poli (2005)

O tempo requerido para a aquisição de uma única linha é denominado de tempo de integração. No momento em que o sensor recebe a radiação (fótons) é produzida uma carga elétrica que deve ser amplificada, quantificada e gravada, para então o sistema realizar uma descarga eletrônica (automática) e possibilitar que uma nova radiação possa ser quantificada. Esse processo de carga e descarga, com as respectivas quantificações, termina quando a quantidade de “n” linhas (ou imagens) estiverem gravadas.

Conforme descrito por Poli (2005), para gerar uma grade regular no terreno, durante o processo de varredura linear, o intervalo de tempo é normalmente definido através da resolução espacial nominal (GSD) que se deseja obter e que é função da velocidade da plataforma ( $v$ ) e do tempo de integração ( $\Delta t$ ). Logo:

$$px = v \cdot \Delta t \quad (1)$$

e levando-se em consideração as imagens com resolução padronizada para as direções x e y, tem-se:

$$p_y = \frac{p \cdot H}{f} \quad (2)$$

onde  $p$  é o tamanho do pixel no terreno,  $H$  é a altitude da plataforma e  $f$  é a distância focal. Assim, impondo que  $p_x = p_y$ , tem-se:

$$\Delta t = \frac{p \cdot H}{v \cdot f} \quad (3)$$

Como exemplo, em imagens obtidas a partir do sensor CCD do IKONOS II, para a posição nadir, é possível obter imagens com resolução espacial de 0,85 metros e, considerando-se as seguintes características (KRAMER, 2002):

- sensor linear com 13.500 pixels com dimensão de 12 $\mu$ m;
- distância focal do sensor de 10m;
- altitude H de 681km;
- velocidade  $v=7,2$ km/s; tem-se:

$$\Delta t = \frac{12 \cdot 10^{-3} \cdot 681 \cdot 10^3}{7,2 \cdot 10^3 \cdot 10} = 0,113 \cdot 10^{-3} s$$

Esse tempo de integração corresponde, aproximadamente a 1/13 do tempo de integração do primeiro satélite a operar com sensor *pushbroom* (SPOT-1) e 1/7 do tempo de integração do SPOT-5.

Quanto menor o tamanho de um CCD menor será o tempo de integração disponível, conseqüentemente ocorrerá uma fraca reação nos elementos fotossensíveis, o que torna a quantificação de cargas não muito eficiente, prejudicando a formação da imagem. Para contornar esse tipo de problema o uso de tecnologia TDI (*Time Delay Integration*) foi desenvolvida. Esse tipo de tecnologia consiste, resumidamente, em um processo de multiexposição de um mesmo objeto e pode ser mais bem compreendido com auxílio da Figura 17, onde se tem um exemplo para um sensor (CCD/TDI) operando em três estágios.

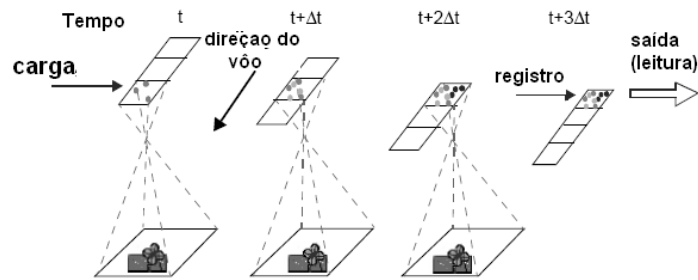


FIGURA 17 – PRINCÍPIO DE EXPOSIÇÃO COM TDI EM TRÊS ESTÁGIOS  
FONTE: Adaptado de Poli (2005)

Cada exposição possibilita o acúmulo de uma determinada quantidade de carga que, ao final das exposições (estágios) é descarregada, amplificada e convertida de sinal analógico para digital.

Exemplos de satélites que operam com esse tipo de tecnologia para a obtenção de imagens de alta resolução são: IKONOS II, SPOT-5, CBERS, KOMPSAT, Quickbird, IRS-1C, OrbView-3.

#### 2.1.3.2. Sensores de quadro (*Full frame*)

O sensor de quadro (*Full Frame*) é um dos sistemas sensores mais utilizados e consiste de uma matriz de sensores digitais - *Charge Coupled Device* (CCD) localizada no plano focal da câmara. As imagens são obtidas de maneira semelhante ao que ocorre nas câmaras aéreas convencionais, ou seja, segundo um único centro de projeção, conforme pode-se observar na Figura 18.

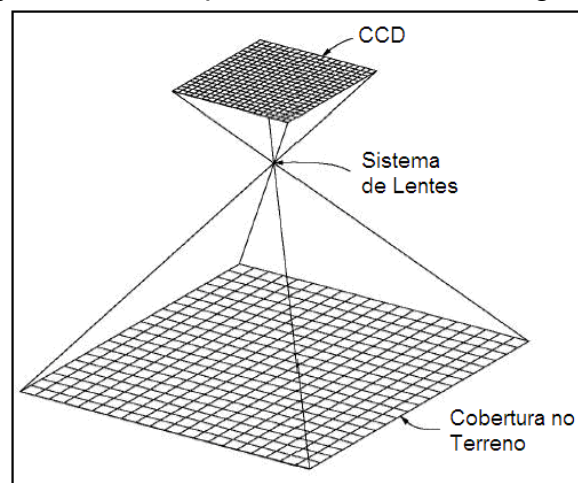


FIGURA 18 – GEOMETRIA DE UMA CÂMARA DIGITAL (*FULL FRAME*)  
FONTE: Wolf (2000)

O sensor *full frame*, formado por uma matriz de elementos CCDs, é sensibilizado durante um intervalo de tempo “t” e registra a energia eletromagnética proveniente da interação entre a radiação solar e os objetos da superfície. Nesse caso, assim como nas câmaras métricas amplamente utilizadas em operações de mapeamento fotogramétrico, a imagem possui seis parâmetros definidores da orientação exterior.

#### 2.1.3.3. Sensor de varredura mecânica (*Whiskbroom*)

O sensor de varredura mecânica, também chamado de sensor eletro-óptico mecânico, é composto basicamente por uma parte óptica (sistema de lentes), um espelho oscilante e um sistema detector para registrar a radiação eletromagnética proveniente dos alvos da superfície terrestre, como pode-se observar na Figura 19.

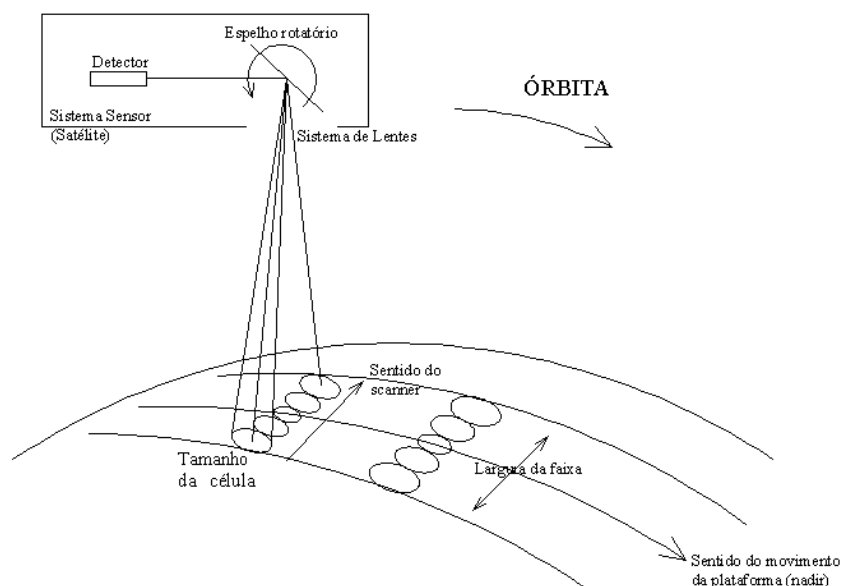


FIGURA 19– GEOMETRIA DE UM SENSOR DE VARREDURA MECÂNICA (*WHISKBROOM SCANNER*)

FONTE: O autor (2011)

Verifica-se na Figura 19 que a aquisição das informações com este tipo de sensor é realizada *pixel a pixel*, ou seja, cada *pixel* é coletado num dado instante de tempo “t”. O espelho oscila num determinado intervalo angular, também conhecido como FOV (*Field of View*), com uma dada velocidade. Os problemas que causam distorções nas imagens, tais como, os ocasionados pelo movimento da plataforma, movimento de rotação da Terra e concatenação dos *pixels*, fazem que sejam necessárias correções geométricas na imagem bruta. Na Figura 20 observa-se um dos principais problemas geométricos encontrados na geração de imagem que operam com esse tipo de sensor (quanto mais afastado da posição nadir, maiores são as distorções geométricas).

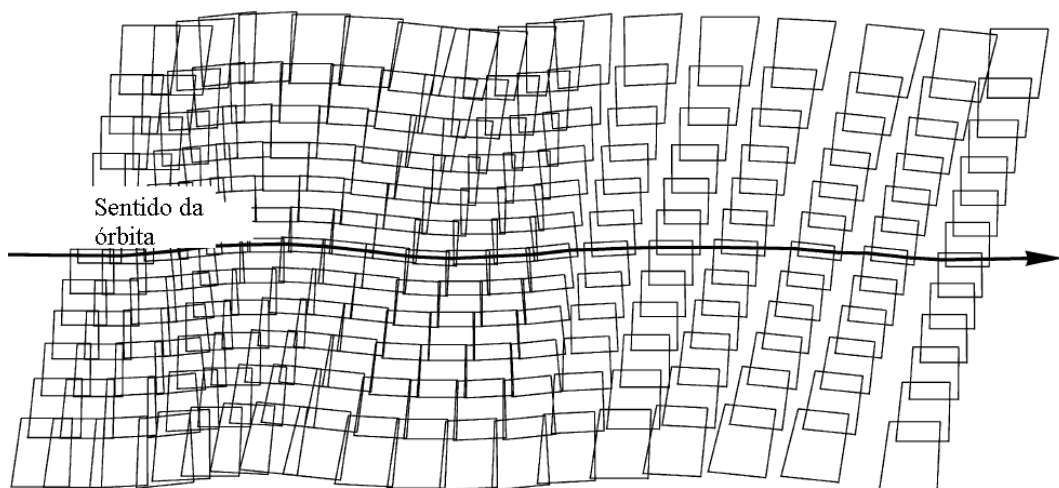


FIGURA 20 – DISTORÇÕES EM IMAGENS OBTIDAS COM SENSORES *WHISKBROOM*  
 FONTE: Adaptado de Breuer e Albertz (2000)

Os satélites pioneiros lançados em órbita para operar com sensores *whiskbroom* foram os satélites da família Landsat. Atualmente, ainda é possível obter imagens proveniente do sensor TM do Landsat 5, que disponibiliza imagens com resolução espacial nominal de 30 x 30 m em seis bandas espectrais.

#### 2.1.4 Aquisição de estereogramas orbitais

Para obter informações tridimensionais a partir de imagens (bidimensionais) torna-se necessário dispor de pares estereoscópicos. Atualmente, existem diferentes formas de obtenção desses pares estereoscópicos, a partir das principais plataformas orbitais existentes.

Referente ao tipo de órbita existem, basicamente, dois métodos de aquisição de estereogramas orbitais: o método *along-track* (sobre a órbita) e o *across-track* (fora da órbita). O método *across-track* foi o primeiro método a ser utilizado para obtenção de estereogramas orbitais com sensores do tipo *pushbroom*. Esse método de obtenção ainda é bastante utilizado e captura pares estereoscópicos a partir de diferentes órbitas, através da mudança do ângulo de visada do sensor, conforme se pode observar na Figura 21.

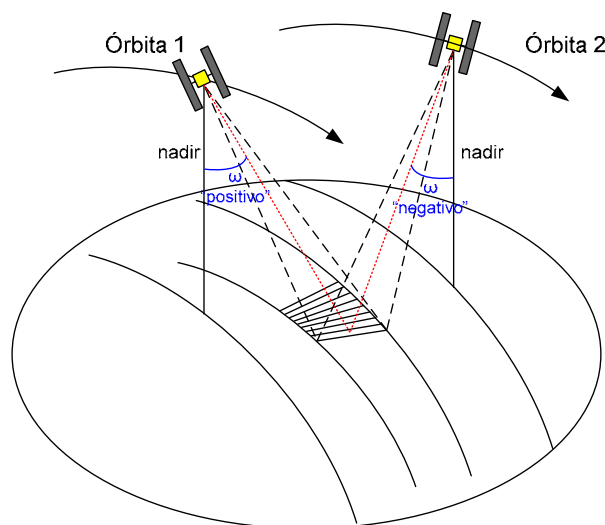


FIGURA 21 – GEOMETRIA ACROSS-TRACK PARA AQUISIÇÃO DE ESTEREOIMAGENS  
Fonte: O autor (2011)

Por se tratar de um método que captura estereogramas a partir de diferentes órbitas, esse método possui a desvantagem de capturar imagens com diferença de dias, o que pode ocasionar diferenças radiométricas consideráveis entre as imagens devido às diferenças no efeito da refração atmosférica, posição solar entre outros. Os satélites da família SPOT e IRS são exemplos de plataformas

que operam com sensores que capturam estereoisagens dessa forma.

O método conhecido como *along-track* coleta informações de uma mesma área, a partir de uma mesma órbita, conforme pode ser observado na Figura 22. De maneira semelhante ao método *across-track*, o método *along-track* obtém as estereoisagens a partir da alteração do ângulo de visada do sensor. A diferença entre o método *across-track* e *along-track* é que esse último efetua visada para frente (*forward*) e para trás (*backward*) para obter o par estereoscópico.

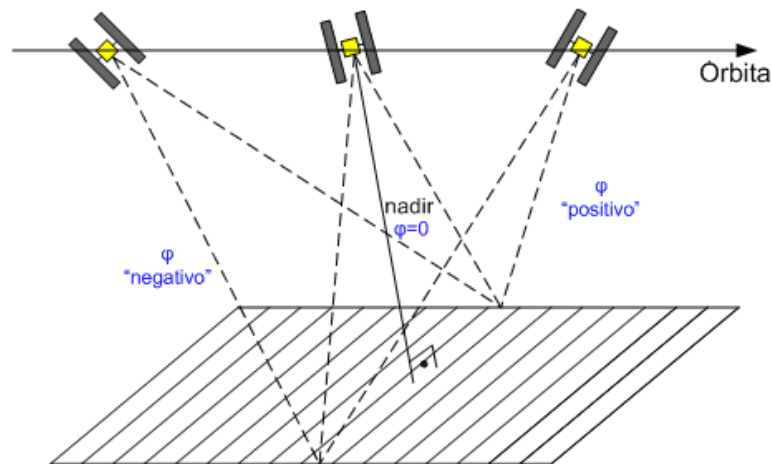


FIGURA 22 – GEOMETRIA ALONG-TRACK PARA AQUISIÇÃO DE ESTEREOISAGENS  
FONTE: O autor (2011)

A grande vantagem da obtenção de pares estereoscópicos com o método *along-track*, em relação ao *across-track*, é o curto intervalo de tempo entre as duas imagens, geralmente de alguns segundos, o que acarreta uma redução nas variações radiométricas entre o par de imagens (DIAL, 2000). Isto ocorre porque fatores como a refração atmosférica e a iluminação solar são muito semelhantes.

Sobre o modo de operação do sistema sensor, as estereoisagens podem ser obtidas no modo sincronizado e no modo não sincronizado. Este sincronismo se refere ao tempo entre varreduras. Quando o modo de obtenção é sincronizado isto significa que a velocidade de deslocamento da plataforma é que define a velocidade de aquisição da imagem, não havendo variação no ângulo de visada do sistema sensor durante o processo de aquisição da cena (FIGURA 23). O satélite IKONOS II opera com esse tipo de tecnologia para obtenção das estereoisagens.

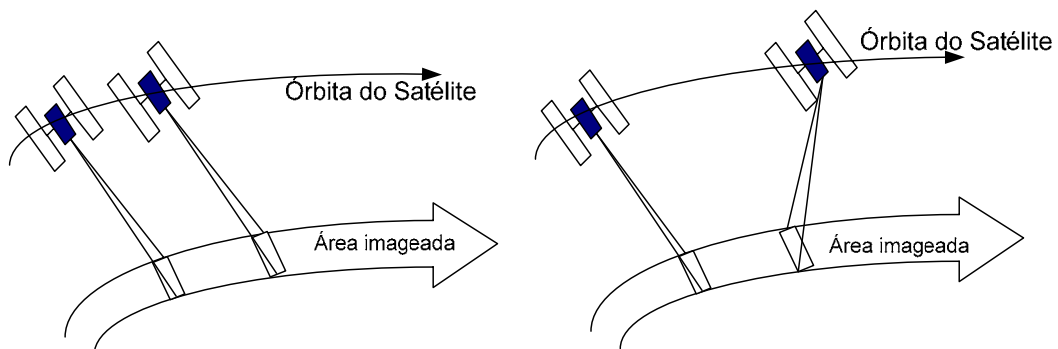


FIGURA 23 – AQUISIÇÃO SINCRONIZADA (ESQUERDA) E NÃO SINCRONIZADA (DIREITA)  
 FONTE: Adaptado de Giannone (2006)

Já no modo não-síncrono, ocorre uma variação do ângulo de visada do sensor no momento da varredura durante a aquisição da cena. Apesar do modo não síncrono efetuar uma varredura numa velocidade diferente da velocidade de deslocamento da plataforma, o tempo de integração permanece constante. O satélite QuickBird é um exemplo de plataforma que opera com sensores lineares que obtêm pares estereoscópicos com o método along-track não sincronizado.

Outro método para obtenção de estereoidimagens orbitais bastante utilizado é o que opera com arranjo de três sensores lineares (TLS – *Three-Line Scanner*). Nesse caso, o número de lentes para a aquisição das imagens pode ser de uma para todos os sensores (FIGURA 24a) ou uma para cada sensor (FIGURA 24b e c). No caso de uma lente para cada sensor, são efetuadas visadas simples em cada sensor CCD, enquanto que nos sistemas com mais de uma lente, são efetuadas múltiplas visadas. Os sistemas tri lineares efetuam aquisição contínua da superfície terrestre, ou seja, cada área da superfície é “fotografada” três vezes. Nesse caso as três imagens, obtidas por cada sensor linear, são capturadas com diferentes ângulos de visada, geralmente, com um sensor direcionado para frente (*forward*) um na posição nadir e outro direcionado para trás (*backward*).



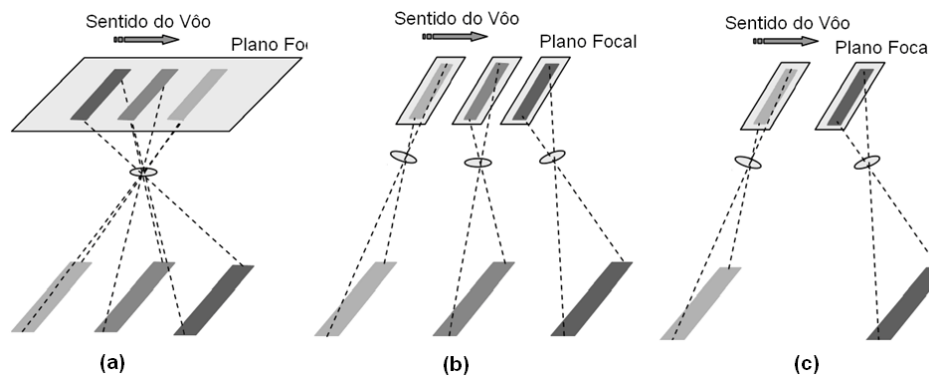


FIGURA 24 – SISTEMA TRILINEAR PARA ESTEREOIMAGENS: UMA LENTE PARA OS TRÊS SENSORES (A) E SISTEMA COM LENTES INDEPENDENTES (B E C)

FONTE: Adaptado de Poli (2005)

Câmaras digitais como as do modelo ADS-40 (*Leica Geosystems*) e STARIMAGER são equipamentos que utilizam de sensores TLS para a obtenção de estereogramas. O Satélite ALOS (FIGURA 25) possui um sistema para aquisição de estereogramas baseado em três sistemas ópticos com sensores *pushbroom* que operam de modo a obter imagens de uma mesma área com visada para frente, para trás e nadir. O SPOT 5, operando com dois sensores lineares (HRS), captura estereogramas *forward* e *backward* (para frente e para trás). O VNIR (*Visible and Near Infra Red*) é um subsistema consistindo de dois telescópios independentes, semelhante ao HRS-SPOT5, que captura imagens com visadas no nadir e *backward* ( $-15^\circ$ ).

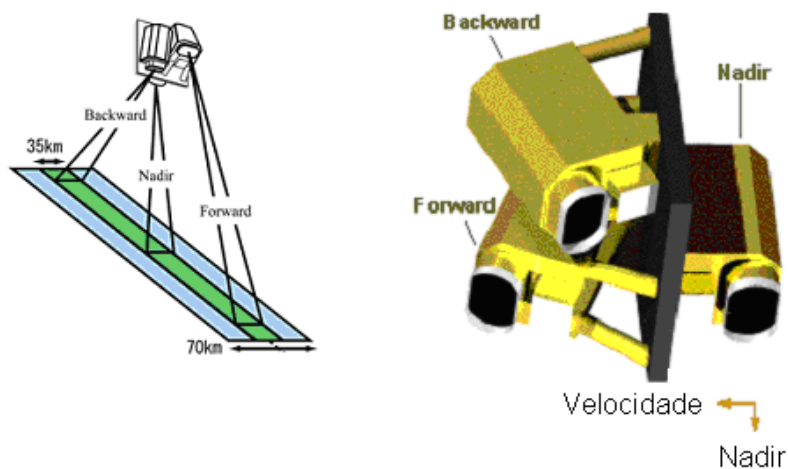


FIGURA 25 – ALOS - PRISM

FONTE: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/prism.htm>

## 2.2 PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO EM IMAGENS ORBITAIS

A Fotogrametria tem como objetivo principal a geração de mapas ou, simplesmente, a determinação precisa de coordenadas tridimensionais, fonte importantíssima para a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT). Neste contexto, um dos principais problemas do processamento fotogramétrico é estabelecer e solucionar a relação matemática entre coordenadas dos dois sistemas envolvidos (imagem e terreno), ou seja, determinar a posição e atitude das imagens de acordo com o sistema de referência do espaço-objeto utilizado.

A determinação de coordenadas tridimensionais, exclusivamente, a partir de imagens, é possível quando se dispõe pares estereoscópicos. Conceitos como “orientação interior” e “orientação exterior” são utilizados repetitivamente em Fotogrametria quando procedimentos que visam a determinação de coordenadas tridimensionais via “intersecção espacial” são empregados.

### 2.2.1 Orientação Interior

A orientação interior, ou o modelo de sensor, define as características do sistema óptico do sensor a fim de estabelecer a relação geométrica entre pontos do espaço-objeto e seu correspondente no espaço-imagem (MIKHAIL, BETHEL; MCGLONE, 2001). São incluídos como características internas a distância focal do sistema sensor, a posição do ponto principal, as dimensões do elemento sensor e também a descrição dos elementos que definem o modelo de distorções do sistema de lentes.

Em imagens digitais provenientes de câmeras sem marcas fiduciais, o processo de orientação interior pode ser simplificado com translações, reflexão de eixos e fator de escalas que transforma as medidas feitas no sistema de

coordenadas de imagem (C,L) para o referencial em milímetros (x,y) com origem no centro da imagem, conforme apresentado na Figura 26 e Equação 4.

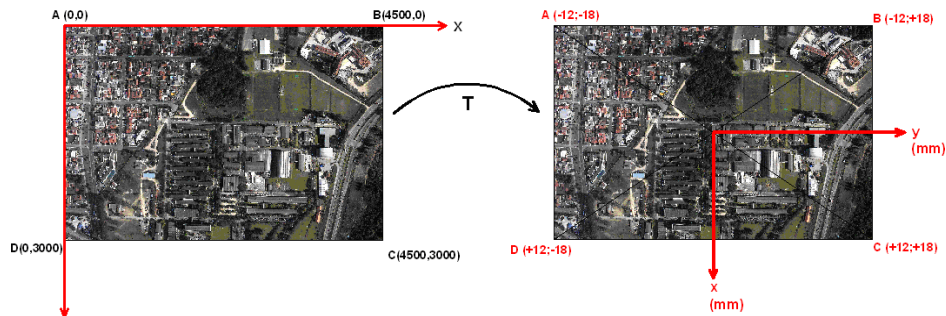


FIGURA 26 – ORIENTAÇÃO INTERIOR EM FOTOGRAFIAS DIGITAIS  
FONTE: O autor (2011)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{milímetro}} = \begin{bmatrix} Tp & 0 \\ 0 & Tp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ L \end{bmatrix}_{\text{pixel}} + \begin{bmatrix} \frac{-(N_{tcol}).Tp}{2} \\ \frac{(N_{tlin}).Tp}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde  $Tp$  corresponde ao tamanho do *pixel*; e  $N_{tcol}$  e  $N_{tlin}$  representam, respectivamente, o número total de colunas e linhas existentes na imagem.

Já para as imagens orbitais, obtidas a partir de sensores *pushbroom*, o modelo de sensor pode ser definido com base nas considerações postas da Figura 27.

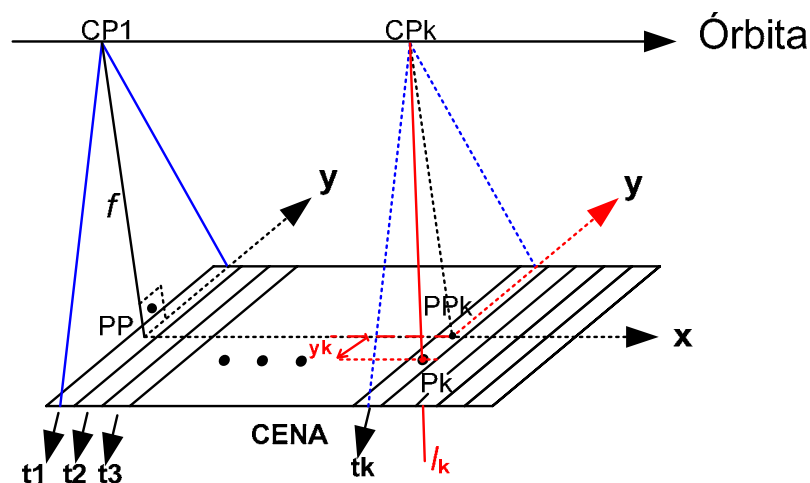


FIGURA 27 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR NO SENSOR *PUSHBROOM*  
FONTE: O Autor (2011)

Sendo os elementos contidos na Figura 27:

- $P_k$  = Ponto imagem;
- $y_k$  = corresponde ao valor da coordenada “y” de imagem para o ponto

$P_k$

- $f$  = distância focal da câmara;
- $CP_k$  = centro perspectivo da linha  $k$ , alinhado com a órbita.
- $PP_k$  = ponto principal para a linha  $k$ ;
- $l_k$  = raio de luz da linha que une o centro perspectivo  $CP_k$  e o ponto  $P_k$ .

A partir do que foi exposto, conclui-se que a coordenada “x” de imagem não faz parte de forma direta do modelo de sensor das imagens *pushbroom*, pois foi considerado que cada linha corresponde a uma imagem individual, logo:

$$[x] = 0 \quad (5)$$

$$[y]_{\text{milímetro}} = \left\{ y_{col} - \left[ \left( \frac{N_{tcol}}{2} \right) \right] \right\} * Tp \quad (6)$$

onde  $Tp$  corresponde ao tamanho do *pixel* em milímetros;  $y_{col}$  a coluna correspondente ao ponto imagem e  $N_{tcol}$  representa o número total de colunas da imagem.

As correções devidas ao afastamento do ponto principal e distorções de lentes não foram consideradas aqui no processo de recuperação da geometria projetiva.

### 2.2.2 Orientação Exterior

Segundo Mikhail, Bethel e McGlone (2001) o processo de orientação exterior tem por objetivo determinar a posição e atitude da imagem orbital em relação a um dado referencial do espaço-objeto. No caso de imagem de quadro, como mostrado na Figura 28 (a), seis parâmetros, sendo três de posição ( $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ ) e três de atitude ( $\kappa$ ,  $\omega$  e  $\phi$ ), posicionam e orientam a imagem no referencial geodésico ou cartográfico.

Nos sensores lineares é possível utilizar diversos modelos matemáticos para estabelecer o relacionamento geométrico entre as coordenadas do espaço-imagem com as coordenadas do espaço-objeto. Verifica-se na Figura 28 (b) que cada linha possui seis parâmetros de orientação (três de atitude e três de posição), de maneira análoga ao sensor de quadro. Conforme será apresentado na seção 2.3.1 a modelagem matemática rigorosa para sensores *pushbroom* utiliza funções matemáticas que permitem recuperar os POE para cada linha no instante do imageamento.

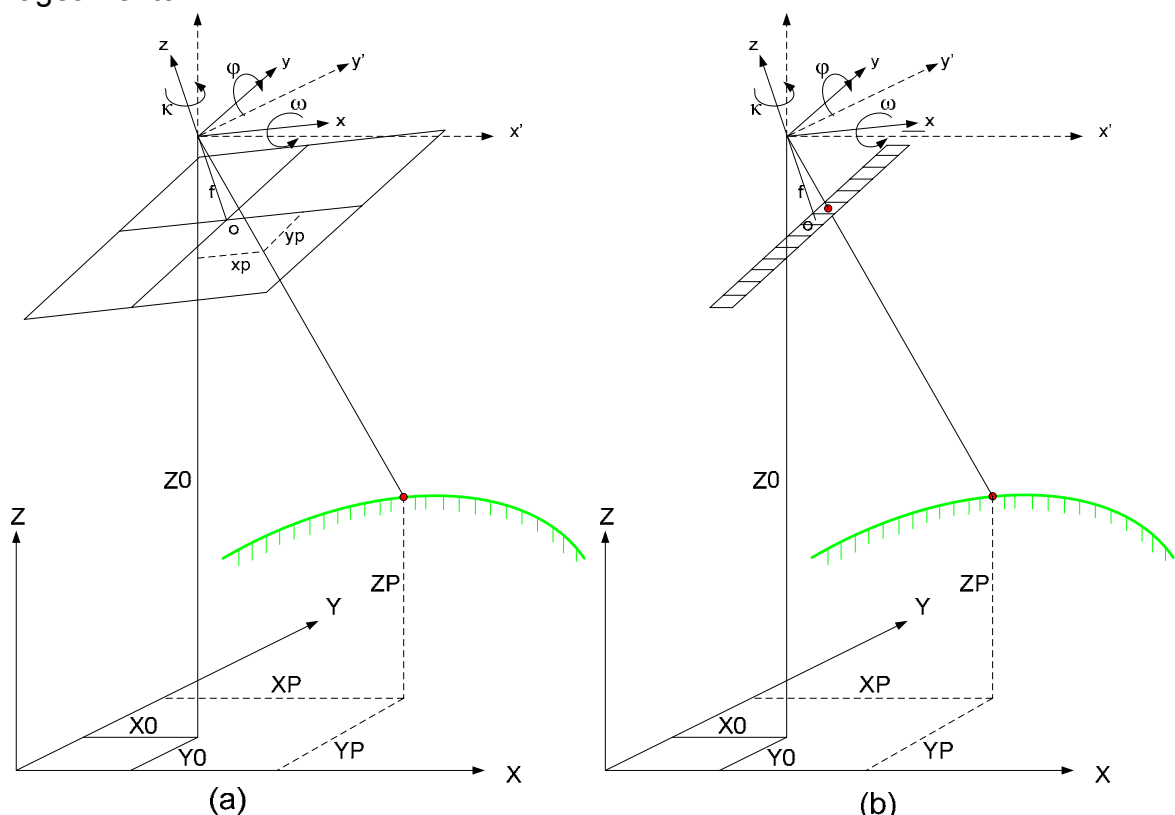


FIGURA 28 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR SENSOR DE QUADRO (A) E LINEAR (B)

FONTE: O autor (2011)

O processo de determinação dos parâmetros de orientação exterior das imagens é conhecido como resseção espacial e na forma tradicional, utiliza a equação da colinearidade para estabelecer a relação geométrica entre o sistema do espaço-imagem e o sistema do espaço-objeto. A equação de colinearidade pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = k.M \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde: (x, y, -f) corresponde às coordenadas de imagem; k é um fator de escala; M corresponde a uma matriz de rotação contendo os ângulos de orientação da imagem; X,Y e Z representam as coordenadas do ponto no sistema de referência do espaço-objeto; e X<sub>0</sub>,Y<sub>0</sub> e Z<sub>0</sub> correspondem à posição do centro de perspectiva no sistema de referência do espaço-objeto.

A obtenção da matriz de rotação “M” está fundamentada numa seqüência de três rotações, sendo por exemplo as seguintes convenções de rotação: “ω” no eixo X, “φ” no eixo Y e “κ” no eixo Z. As matrizes nos três eixos cartesianos são apresentadas a seguir:

$$M_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$M_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Considerando, por exemplo, a seqüência de rotações nos três eixos cartesianos (X,Y e Z), dada como primária, secundária e terciária respectivamente, a matriz de rotação é construída a partir do produto das três matrizes (M<sub>κ</sub> M<sub>φ</sub> e M<sub>ω</sub>):

$$M = M_{\kappa}.M_{\varphi}.M_{\omega} \quad (11)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \sin \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Para determinar os parâmetros de orientação de um par de fotografias ou imagens orbitais, o método a que mais se recorre é a aerotriangulação por feixes de raios perspectivos (*bundle adjustment*). Esse processo (BRITO e COELHO, 2002) pode ser entendido como sendo a execução de uma resseção espacial simultânea de imagens ou ajustamento simultâneo de feixes de raios que permitem a determinação dos parâmetros de orientação exterior das imagens, associadas às coordenadas no espaço-objeto de pontos previamente medidos em imagens homólogas.

### 2.2.3 Intersecção Espacial

Amorim (2000) definiu que a Intersecção Espacial (ou Fotogramétrica) é um procedimento empregado na Fotogrametria para calcular coordenadas tridimensionais X, Y e Z, a partir de coordenadas bidimensionais de pontos homólogos medidas em (pelo menos) duas imagens distintas e orientadas.

De acordo com a Figura 29, com as coordenadas de um determinado ponto no sistema de imagem ( $l_1, c_1$  e  $l_2, c_2$ ), os parâmetros de orientação interior e exterior do par estereoscópico e empregando-se as equações de colinearidade obtém-se quatro equações, já que cada ponto gera duas equações por imagem.

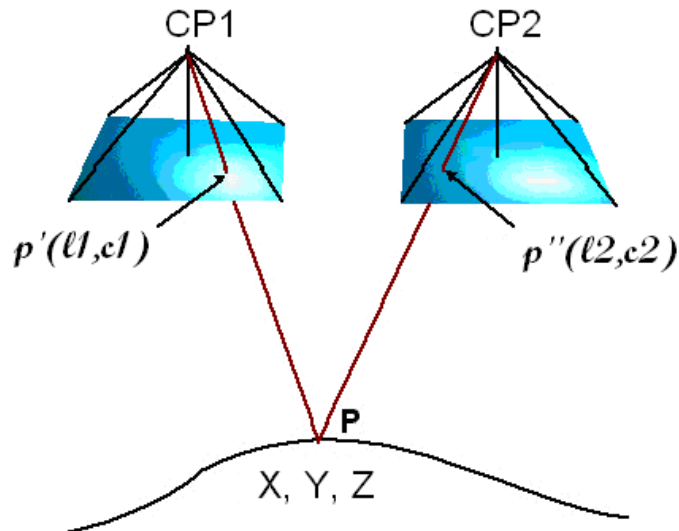


FIGURA 29 - INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA  
FONTE: Brito e Coelho (2002)

A resolução do sistema de quatro equações, utilizando-se o método de ajustamento por mínimos quadrados (MMQ), permite determinar as três incógnitas ( $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ) que são as coordenadas tridimensionais do ponto medido nas imagens, representando a intersecção de dois raios homólogos. Maiores detalhes sobre o procedimento fotogramétrico e do método de ajustamento empregado podem ser obtidos em Merchant (1979) e Gemael (1994) respectivamente.

### 2.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES *PUSHBROOM*

Os modelos matemáticos utilizados para a orientação de imagens orbitais obtidas a partir de sensores *pushbroom* podem ser divididos em duas categorias: os modelos rigorosos e os modelos aproximados; e são utilizados para representar matematicamente o relacionamento entre coordenadas de pontos no sistema do espaço imagem com as respectivas coordenadas homólogas, num referencial no espaço-objeto. Esses modelos são de extrema importância nas atividades de mapeamento que envolvem a extração de informações espaciais com base em



pares estereoscópicos, geração de ortoimagens e também a geração de Modelos Digitais do Terreno.

A diferença básica entre os modelos aproximados e os rigorosos é que a modelagem matemática rigorosa leva em consideração o processo de aquisição da cena, ou seja, permite estimar os parâmetros que modelam a forma real (ou física) com que as imagens foram adquiridas. Nos sensores *pushbroom*, a modelagem rigorosa permite obter os parâmetros de orientação exterior para cada linha. Já os modelos aproximados consideram a cena como sendo uma única imagem em projeção perspectiva e obtida num único instante de tempo.

### 2.3.1 Modelos rigorosos

Segundo Morgan (2004) os modelos rigorosos para sensores lineares descrevem a forma física com que a cena é obtida, conforme o tempo de aquisição de cada linha. De acordo com Zang (2005), os modelos rigorosos consideram os parâmetros físicos do sensor e da plataforma como, distância focal, dimensões do CCD, parâmetros de órbita do satélite e os ângulos de atitude com suas respectivas representações matemáticas.

De acordo com Fritsch e Stallmann (2000), Grodecki (2001) e Kim e Dowman (2006), a modelagem rigorosa considera o registro de cada linha num diferente instante de tempo ( $t$ ), conforme pode-se verificar na Figura 30. Como consequência, cada linha da cena possui seis parâmetros de orientação exterior. Já a respeito dos parâmetros de orientação interior, como distância focal, localização do ponto principal, coeficientes de distorção e outros parâmetros, diretamente relacionados com a concepção física do sensor, permanecem os mesmos para todas as linhas da cena.

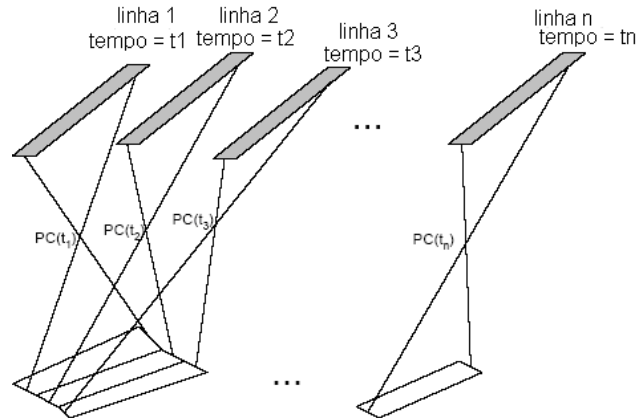


FIGURA 30 – *PUSHBROOM SENSOR* – SENSOR DE VARREDURA LINEAR  
FONTE: Grodecki 2001

De acordo com Gagan (1987), o relacionamento matemático entre os espaços da imagem e do terreno fundamenta-se na condição de colinearidade que estabelece que o ponto imagem ( $p$ ), seu homólogo no espaço objeto ( $P$ ) e o centro perspectivo ( $CP$ ) pertencem a uma mesma reta, como mostrado na Figura 31.

Para representar a geometria de imageamento de sensores *pushbroom*, conforme mostrado nas Equações 12, a coordenada “ $x$ ” é igualada a zero, pois admite-se aqui que a imagem é unidimensional, formada somente no sentido do eixo “ $y$ ”. Assim a coordenada “ $y$ ” de um ponto é calculada com base no número de colunas que ponto possui na imagem e da dimensão do elemento CCD. Maiores detalhes dessa transformação podem ser encontrados em Kim e Dowman, (2006).

$$x = 0 = -f * \frac{r_{11}(X - X_s) + r_{21}(Y - Y_s) + r_{31}(Z - Z_s)}{r_{13}(X - X_s) + r_{23}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)} \quad (12)$$

$$y = -f * \frac{r_{12}(X - X_s) + r_{22}(Y - Y_s) + r_{32}(Z - Z_s)}{r_{13}(X - X_s) + r_{23}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)}$$

onde:

$x, y$  = coordenadas de imagem (mm);

$X, Y, Z$  = coordenadas de Terreno;

$f$  = distância focal;

$X_s, Y_s, Z_s$  = coordenadas para o centro perspectivo do sistema sensor, no

referencial de terreno;

$r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{33}$  = elementos da matriz de rotação em função dos ângulos  $\omega$ ,  $\varphi$  e  $\kappa$ .

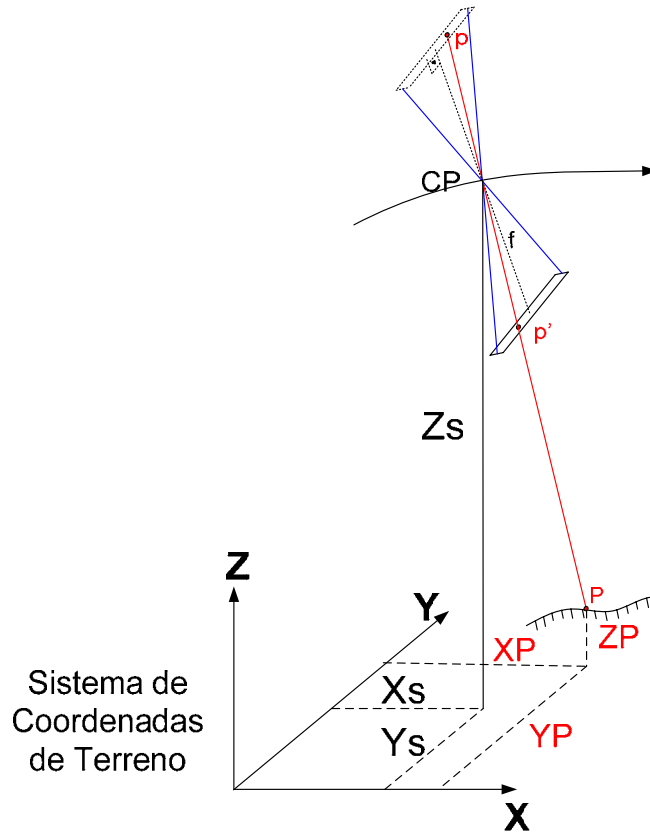


FIGURA 31 – COLINEARIDADE E GEOMETRIA PARA SENSORES *PUSHBROOM*  
 FONTE: Adaptado de Kim e Dowman (2006)

A modelagem rigorosa leva em consideração a posição do satélite ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) no momento da aquisição da imagem (linha) e os ângulos de rotação do sistema sensor em relação ao sistema de coordenadas do espaço-objeto ( $\kappa, \varphi, \omega$ ), representados implicitamente na matriz de rotação. Os elementos da matriz de rotação ( $r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{33}$ ) servem para alinhar o sistema do sensor com o sistema de referência terrestre. Este modelo foi chamado por Kim e Dowman (2006) de Posição-Rotação (*Position-Rotation*), apresentado na forma matricial mostrada na Equação 13.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \cdot R^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (13)$$

onde:

$R$  = matriz de rotação, dada em função dos ângulos  $\kappa$ ,  $\varphi$  e  $\omega$ ; e

$\lambda$  = fator de escala.

Conforme comentado anteriormente, cada linha é obtida num instante de tempo “ $t$ ”, e como consequência possui seis parâmetros de orientação exterior ( $X_s, Y_s, Z_s, \kappa, \omega, \varphi$ ). Para toda a cena, de acordo com Kim e Dowman (2006), a determinação desses parâmetros é dependente do tempo e pode ser modelada por polinômios de segundo grau, conforme descrito nas Equações 14.

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1.t + b_1.t^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2.t + b_2.t^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3.t + b_3.t^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_0 + a_4.t + b_4.t^2 \\
 \varphi_s &= \varphi_0 + a_5.t + b_5.t^2 \\
 \omega_s &= \omega_0 + a_6.t + b_6.t^2
 \end{aligned} \tag{14}$$

onde:

$X_0, Y_0, Z_0, \kappa_0, \omega_0, \varphi_0$  são os parâmetros de orientação exterior para a primeira linha da cena (ou instante  $t=0$ );

$a_1, a_2, \dots, a_6, b_1, b_2, \dots, b_6$  são os coeficientes polinomiais do modelo matemático;

$X_s, Y_s, Z_s, \kappa_s, \omega_s, \varphi_s$  são os parâmetros de orientação exterior para um dado instante de tempo “ $t$ ”;

$t$  é um dado instante de tempo.

A solução matemática utilizando a abordagem citada, segundo os trabalhos de Orun e Natarajan (1994) e Kim e Dowman (2006), não conduz à uma solução eficiente utilizando-se os 18 parâmetros. Isso ocorre porque nos sensores *pushbroom* alguns parâmetros apresentam alta correlação entre si, o que torna instável a solução do sistema de equações no ajustamento por mínimos quadrados.

A correlação matemática entre parâmetros citadas no trabalho de Orun e

Natarajan (1994) pode ser facilmente compreendida pela Figura 32. Verifica-se nessa, que no caso de sensores pushbroom pequenas variações em  $\varphi$  geram o mesmo efeito na imagem se pequenas variações em  $X_s$  ocorressem, assim como as pequenas variações em  $\omega$  estão correlacionadas com pequenas variações em  $Y_s$ .

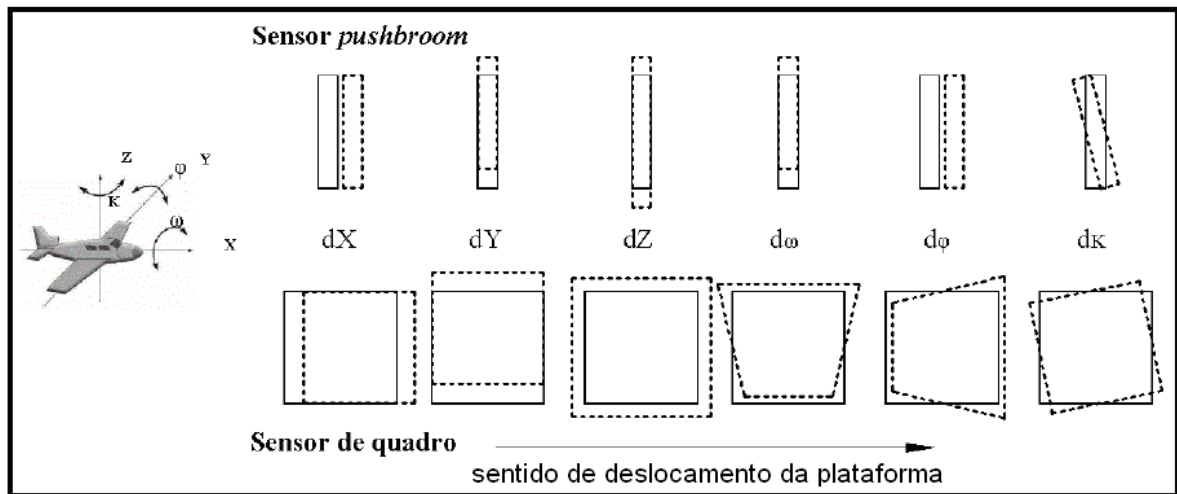


FIGURA 32 – COMPARAÇÃO ENTRE VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR PARA IMAGEM DE QUADRO E DE SENSORES LINEARES  
FONTE: Orun e Natarajan (1994)

Orun e Natarajan (1994), para evitar o problema de correlação entre os parâmetros citados anteriormente, recomenda considerar nas equações 14 os parâmetros  $\varphi$  ou  $X_s$  como sendo constantes e o mesmo procedimento para  $\omega$  ou  $Y_s$ , resultando um conjunto de somente 12 parâmetros. Em seus experimentos foi considerado o efeito dos ângulos  $\varphi$  e  $\omega$  como sendo constantes e com valores fixos para toda a varredura. Assim, o ângulo “ $\varphi$ ” foi estipulado com valor igual a zero e o ângulo “ $\omega$ ” com um valor fixo, constante. Dessa forma, os parâmetros utilizados na equação de colinearidade ficaram representado como postos na Equação 15:

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_0 + a_1 \cdot x + b_1 \cdot x^2 \\
 Y_s &= Y_0 + a_2 \cdot x + b_2 \cdot x^2 \\
 Z_s &= Z_0 + a_3 \cdot x + b_3 \cdot x^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Sendo “ $\varphi = 0$ ” e “ $\omega = \text{cte}$ ”, a matriz de rotação é simplificada e pode ser representada como mostrado na Equação 16.

$$R = \begin{pmatrix} \cos \kappa & \cos \omega \cdot \text{sen} \kappa & -\text{sen} \omega \cdot \text{sen} \kappa \\ -\text{sen} \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa & \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \kappa \\ 0 & -\text{sen} \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \quad (16)$$

Expandindo-se a matriz de rotação e substituindo-se os elementos da Equação 15, tem-se:

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2) & \cos \omega \cdot \text{sen}(\kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2) & \text{sen} \omega \cdot \text{sen}(\kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2) \\ -\text{sen}(\kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2) & \cos \omega \cdot \cos(\kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2) & \text{sen} \omega \cdot \cos(\kappa_0 + a_4 \cdot x + b_4 \cdot x^2) \\ 0 & -\text{sen} \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \quad (17)$$

Apesar do trabalho de Orun e Natarajan (1994) resolver o problema de correlação entre parâmetros do modelo, desconsiderando os ângulos “ $\varphi$ ” e “ $\omega$ ” como parâmetros incógnitos, essa solução não apresenta bons resultados na intersecção espacial quando imagens obtidas com visada fora do nadir são empregadas, como pode ser vistos nas exatidões obtidas nos trabalhos de Bang e Cho (2001). Nesse contexto, diferentes configurações de parametrização dos parâmetros de orientação exterior para a utilização da modelagem rigorosa podem ser empregadas. Os trabalhos como os de Bang e Cho (2001), Gagan e Dowman (2006), Kim T., Kim H. e Rhee (2007), Medeiros (2007) e Marcato Jr. (2011) realizaram experimentos com mais de um tipo de modelo matemático rigoroso, alterando-se o grau dos polinômios. O Quadro 1 mostra os dez tipos de configurações utilizadas por Bang e Cho (2001) para orientação de pares estereoscópicos do sensor EOC do satélite KompSat-1 para fins de obtenção de coordenadas tridimensionais por intersecção espacial.

<b>I</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2$ $\omega_s = \omega_o$ $\phi_s = \phi_o + a_5L$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L$	<b>II</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2$ $\omega_s = \omega_o + a_4L + b_4L^2$ $\phi_s = \phi_o + a_5L + b_5L^2$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L + b_6L^2$	<b>III</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2$ $\omega_s = const$ $\phi_s = const$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L + b_6L^2$	<b>IV</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2 + c_1L^3$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2 + c_2L^3$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2 + c_3L^3$ $\omega_s = \omega_o$ $\phi_s = \phi_o$ $\kappa_s = \kappa_o$	<b>V</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2 + c_1L^3$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2 + c_2L^3$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2 + c_3L^3$ $\omega_s = \omega_o$ $\phi_s = \phi_o + a_5L$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L$
<b>VI</b> $X_s = X_o + a_1L$ $Y_s = Y_o + a_2L$ $Z_s = Z_o + a_3L$ $\omega_s = \omega_o$ $\phi_s = \phi_o$ $\kappa_s = \kappa_o$	<b>VII</b> $X_s = X_o + a_1L$ $Y_s = Y_o + a_2L$ $Z_s = Z_o + a_3L$ $\omega_s = \omega_o + a_4L$ $\phi_s = \phi_o + a_5L$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L$	<b>VIII</b> $X_s = X_o + a_1L$ $Y_s = Y_o + a_2L$ $Z_s = Z_o + a_3L$ $\omega_s = const$ $\phi_s = const$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L$	<b>IX</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2$ $\omega_s = \omega_o$ $\phi_s = \phi_o$ $\kappa_s = \kappa_o$	<b>X</b> $X_s = X_o + a_1L + b_1L^2$ $Y_s = Y_o + a_2L + b_2L^2$ $Z_s = Z_o + a_3L + b_3L^2$ $\omega_s = \omega_o + a_4L$ $\phi_s = \phi_o + a_5L$ $\kappa_s = \kappa_o + a_6L$

QUADRO 1– DIFERENTES POLINÔMIOS PARA MODELAGEM RIGOROSA  
 FONTE: Adaptado de Bang e Cho (2001)

Segundo Bang e Cho (2001) dentre os experimentos realizados, apenas os modelos onde se considerava “ $\omega$ ” e “ $\phi$ ” como constantes (modelo III e VIII do Quadro 10) não alcançaram exatidão dentro do padrão de tolerância requerida,

Medeiros (2007) utilizou no seu trabalho de doutorando a modelagem rigorosa, aplicada para correção geométrica de uma imagem CCD do Satélite CBERS-2, empregando três metodologias para a orientação: a primeira com o modelo dos planos equivalentes adaptado, a segunda com o modelo de coplanaridade para retas e a terceira com um modelo mais simplificado, utilizando-se a equação de colinearidade e pontos de apoio. Associados a esses, foram utilizados dois tipos de configurações para os polinômios, uma com doze parâmetros e outra com oito, conforme mostrado no Quadro 2.

<b>A</b> $\begin{pmatrix} X_s = X_0 + a_1.t + b_1.t^2 \\ Y_s = Y_0 + a_2.t + b_2.t^2 \\ Z_s = Z_0 + a_3.t + b_3.t^2 \\ \kappa_s = \kappa_0 + a_4.t + b_4.t^2 \\ \phi_s = cte \\ \omega_s = cte \end{pmatrix}$	<b>B</b> $\begin{pmatrix} X_s = X_0 + a_1.t \\ Y_s = Y_0 + a_2.t \\ Z_s = Z_0 + a_3.t \\ \kappa_s = \kappa_0 + a_4.t \\ \phi_s = cte \\ \omega_s = cte \end{pmatrix}$
---	---

QUADRO 2 – MODELOS RIGOROSOS COM 12 E 8 PARÂMETROS  
 FONTE: Adaptado de Medeiros (2007)

Os resultados obtidos nos experimentos, em geral, comprovaram que, para o tipo de cena utilizada em seus experimentos, a melhor opção encontrada para a

correção geométrica foi a que utilizou a modelagem rigorosa com 8 parâmetros com base na equação de colinearidade com pontos de controle no terreno. As exatidões obtidas em planimetria empregando pontos de verificação foi inferior à dimensão do *pixel*.

No trabalho apresentado por Kim T., Kim H. e Rhee ( 2007) foram obtidas exatidões planimétricas com diferentes modelos de orientação, obtendo valores compatíveis com a precisão das imagens SPOT 3. Utilizou-se de modelos rigorosos com base na posição e atitude do satélite e de modelos rigorosos com base em parâmetros orbitais. Nas matrizes variância e covariância dos parâmetros, obtidas de seus experimentos, foi possível observar valores médios dos desvios padrão dos parâmetros de posição  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ , valores próximos a 7,6 Km, 17,6 km e 23,4 km, respectivamente. A principal justificativa, apresentada pelos autores, para valores tão elevados, foi atribuída a existência de correlação entre parâmetros existentes no modelo empregado.

Além da modelagem rigorosa proposta nesse trabalho, existem outras que utilizam-se de teorias da mecânica orbital e dos ângulos de atitude do sensor que podem ser vistas em Salamonowicks (1986); Guran (1987); Radhadevi, Ramachandran e Murali Mohan (1998); Michalis e Dowman (2005). Também existem aquelas baseadas na posição, velocidade e atitude do satélite que podem ser consultadas nos trabalhos de Kim e Dowman (2006); Kim, T, Kim, H. e Rhee (2007) e Marcato Jr (2011).

### 2.3.2 Modelos aproximados (não-rigorosos)

Os modelos aproximados (não rigorosos) são utilizados para a orientação de imagens orbitais obtidas com sensores de diversos tipos, inclusive os sensores do tipo *pushbroom*. De acordo com Morgan (2004), esses modelos representam uma transformação aproximada entre as coordenadas do sistema de imagem com as coordenadas correspondentes do sistema tridimensional. Os experimentos



realizados, mostram que, apesar da condição aproximada desses modelos, os mesmos são bastante eficientes em processos de extração de informações tridimensionais a partir de pares estereoscópicos.

Uma grande vantagem da modelagem aproximada sobre a rigorosa é a não necessidade de informação *a priori* a respeito dos parâmetros que definem a geometria interna do sistema sensor, ou seja, esses modelos relacionam, diretamente, as coordenadas de imagem com suas respectivas homólogas de terreno. Os principais exemplos de modelos aproximados incluem funções matemáticas, como: a DLT, a APM e polinômios racionais de terceiro e segundo grau.

#### 2.3.2.1. Modelo de Função Racional (RFM)

Atualmente, um dos modelos matemáticos aproximados mais utilizados para extração de informações 3D em HRSI são os desenvolvidos com base na razão de polinômios. Alguns autores costumam chamar o modelo RFM (*Rational Function Model*) de RPC. Na verdade os RPC (*Rational Polynomial Coefficients*) são os coeficientes do RFM, comercializados e disponibilizados em conjunto com algumas HRSI. As imagens dos satélites IKONOS II, Geoeye, Quickbird e CartoSat-1 são exemplos de imagens que podem ser adquiridas em conjunto com os RPC.

O modelo RFM relaciona diretamente, através de razão de polinômios de terceira ordem, coordenadas de pontos no espaço-imagem com suas coordenadas correspondentes no terreno (GRODECKI, 2001), conforme é apresentado nas Equações 18.

$$l = \frac{P_1(U, V, W)}{P_2(U, V, W)}$$

(18)

$$c = \frac{P_3(U, V, W)}{P_4(U, V, W)}$$

onde:

- “ $l$ ” e “ $c$ ” correspondem às coordenadas de linha e coluna normalizadas, dadas por:

$$l = (L - O_L) / SF_L ; \quad (19)$$

$$c = (C - O_C) / SF_C ;$$

onde:  $L$  e  $C$  são as coordenadas medidas na imagem,  $O_L$  e  $O_C$  são as translações em relação à origem do sistema de imagem para o sistema normalizado e  $SF_L$  e  $SF_C$  os fatores de escala para as coordenadas de imagem;

-  $U$ ,  $V$  e  $W$  correspondem, respectivamente, às coordenadas normalizadas de latitude, longitude e altura geométrica no espaço objeto, dadas por:

$$\begin{aligned} U &= (\varphi - O_\varphi) SF_\varphi \\ V &= (\lambda - O_\lambda) SF_\lambda ; \\ W &= (h - O_h) SF_h \end{aligned} \quad (20)$$

onde:  $\varphi$ ,  $\lambda$  e  $h$  são as coordenadas de latitude, longitude e altura geométrica, respectivamente;  $O_\varphi$ ,  $O_\lambda$ ,  $O_h$  são os valores médios para a latitude, longitude e altura geométrica, respectivamente; e  $SF_\varphi$ ,  $SF_\lambda$  e  $SF_h$  são os fatores de escala para a latitude, longitude e altura geométrica, respectivamente;

- e  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  são os polinômios de terceira ordem, conforme descrito a seguir:

$$\begin{aligned} P_1 &= a_0 + a_1.V + a_2.U + a_3.W + a_4.V.U + a_5.W.V + a_6.U.W + a_7.V^2 + a_8.U^2 + a_9.W^2 + \\ &a_{10}.V.U.W + a_{11}.V^3 + a_{12}.V.U^2 + a_{13}.V.W^2 + a_{14}.V^2.U + a_{15}.U^3 + a_{16}.U.W^2 + \\ &a_{17}.V^2.W + a_{18}.U^2.W + a_{19}.W^3 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= b_0 + b_1.V + b_2.U + b_3.W + b_4.V.U + b_5.W.V + b_6.U.W + b_7.V^2 + b_8.U^2 + b_9.W^2 + \\ &b_{10}.V.U.W + b_{11}.V^3 + b_{12}.V.U^2 + b_{13}.V.W^2 + b_{14}.V^2.U + b_{15}.U^3 + b_{16}.U.W^2 + \\ &b_{17}.V^2.W + b_{18}.U^2.W + b_{19}.W^3 \end{aligned} \quad (22)$$

$$P_3 = c_0 + c_1.V + c_2.U + c_3.W + c_4.V.U + c_5.W.V + c_6.U.W + c_7.V^2 + c_8.U^2 + c_9.W^2 + c_{10}.V.U.W + c_{11}.V^3 + c_{12}.V.U^2 + c_{13}.V.W^2 + c_{14}.V^2.U + c_{15}.U^3 + c_{16}.U.W^2 + c_{17}.V^2.W + c_{18}.U^2.W + c_{19}.W^3 \quad (23)$$

$$P_4 = d_0 + d_1.V + d_2.U + d_3.W + d_4.V.U + d_5.W.V + d_6.U.W + d_7.V^2 + d_8.U^2 + d_9.W^2 + d_{10}.V.U.W + d_{11}.V^3 + d_{12}.V.U^2 + d_{13}.V.W^2 + d_{14}.V^2.U + d_{15}.U^3 + d_{16}.U.W^2 + d_{17}.V^2.W + d_{18}.U^2.W + d_{19}.W^3 \quad (24)$$

onde:  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{19}, b_0, b_1, b_2, \dots, b_{19}, c_0, c_1, c_2, \dots, c_{19}, d_0, d_1, d_2, \dots, d_{19}$ , são os coeficientes do polinômio (RPC's).

Como exemplo dessa tecnologia, Na Figura 33 são apresentados alguns parâmetros (RPC's) presentes no arquivo de uma imagem IKONOS II.

```

LINE_OFF: +002552.00 pixels
SAMP_OFF: +005082.00 pixels
LAT_OFF: -25.56580000 degrees
LONG_OFF: -049.40360000 degrees
HEIGHT_OFF: +0908.000 meters
LINE_SCALE: +002552.00 pixels
SAMP_SCALE: +005082.00 pixels
LAT_SCALE: +00.02380000 degrees
LONG_SCALE: +000.05830000 degrees
HEIGHT_SCALE: +0081.000 meters
LINE_NUM_COEFF_1: -6.460915911624355E-03
LINE_NUM_COEFF_2: +2.748340231664483E-02
. (até o 20º coeficiente)
.
LINE_NUM_COEFF_19: +2.159391523521090E-04
LINE_NUM_COEFF_20: -2.183728768082222E-07
LINE_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00
LINE_DEN_COEFF_2: +1.868743295684755E-02
. (até o 20º coeficiente)
.
LINE_DEN_COEFF_19: +6.134072617487863E-08
LINE_DEN_COEFF_20: -5.489180688020829E-09
SAMP_NUM_COEFF_1: +9.031506642302040E-02
SAMP_NUM_COEFF_2: +1.154235172437502E+00
. (até o 20º coeficiente)
.
SAMP_NUM_COEFF_19: +2.981138227718541E-07
SAMP_NUM_COEFF_20: +2.098210070511885E-07
SAMP_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00
SAMP_DEN_COEFF_2: +1.868743295684755E-02
. (até o 20º coeficiente)
.
SAMP_DEN_COEFF_19: +6.134072617487863E-08
SAMP_DEN_COEFF_20: -5.489180688020829E-09

```

FIGURA 33 – PARTE DOS COEFICIENTES RPC'S DE UMA IMAGEM IKONOS II  
FONTE: Adaptado de Singh (2008)

Madani (1999) e Jacobsen (2007) explicam como obter os RPC segundo duas abordagens. A primeira determinando os parâmetros independentemente do terreno empregando parâmetros orbitais e a segunda de maneira dependente do terreno, onde são necessários pontos de controle.

Segundo Dial (2000), o método para geração com maior precisão dos *Rational Polynomial Coefficients* – RPC – conhecido como “*terrain independent*” é realizado por meio de receptores GPS (*onboard*) juntamente com um sofisticado

sistema inercial e um sistema para rastreamento de estrelas. As informações obtidas são integradas num processamento para determinação dos parâmetros orbitais, tais como as efemérides e a atitude do satélite no momento de aquisição da cena. Além da necessidade de dispor dos parâmetros definidores da posição da plataforma, a geração dos RPC com essa abordagem é possível quando o modelo físico do sensor está disponível. Em decorrência disso, Tao e Hu (2000) afirmam que os RPC, gerados com essa abordagem, são coeficientes de um modelo matemático que mais se aproxima do modelo rigoroso do sensor, pois baseia-se na utilização de parâmetros físicos e orbitais do sistema sensor.

Jacobsen (2007), afirma que quando os RPC das imagens são fornecidos pelas empresas que as comercializam, a metodologia para a correção geométrica de estereomagens com a utilização da RFM e pelo menos um ponto de apoio, é muito mais confiável do que estimar os parâmetros, diretamente, utilizando pontos de controle. Uma das principais desvantagens em determinar os parâmetros é o grande número de pontos de controle necessários para a solução por ajustamento e a instabilidade da solução devido ao grande número de parâmetros.

Conforme descrito na Seção 2.2.3, o processo de intersecção espacial, aplicado a imagens obtidas por sensores *full-frame* ou *pushbroom*, necessita de um par estereoscópico devidamente orientado e as coordenadas de imagem de pontos homólogos presentes no estereomodelo. São geradas 4 equações de observação para a determinação das três incógnitas, que são as coordenadas tridimensionais do ponto em questão. As Equações 25 e 26 representam as equações para a imagem da esquerda e da direita, respectivamente, e são dadas por:

$$l^{Esquerda} = \frac{P_1^{Esq}(U,V,W)}{P_2^{Esq}(U,V,W)} \quad (25)$$

$$c^{Esquerda} = \frac{P_3^{Esq}(U,V,W)}{P_4^{Esq}(U,V,W)}$$

$$l^{Direita} = \frac{P_1^{Dir}(U,V,W)}{P_2^{Dir}(U,V,W)} \quad (26)$$

$$c^{Direita} = \frac{P_3^{Dir}(U,V,W)}{P_4^{Dir}(U,V,W)}$$

onde:  $l^{Esquerda}$  ;  $c^{Esquerda}$  e  $l^{Direita}$ ,  $c^{Direita}$  são as coordenadas de imagem (normalizadas) de um ponto na imagem da esquerda e da direita, respectivamente;

$P_1^{Dir}, P_2^{Dir}, ..., P_1^{Esq}, ..., P_4^{Dir}$  correspondem aos polinômios de 3ª ordem para a imagem da esquerda e da direita;

e  $U, V, W$  correspondem às coordenadas normalizadas desconhecidas do ponto no espaço objeto.

Na Figura 34 é mostrado o processo de intersecção espacial utilizando-se os RPC de uma imagem IKONOS II.

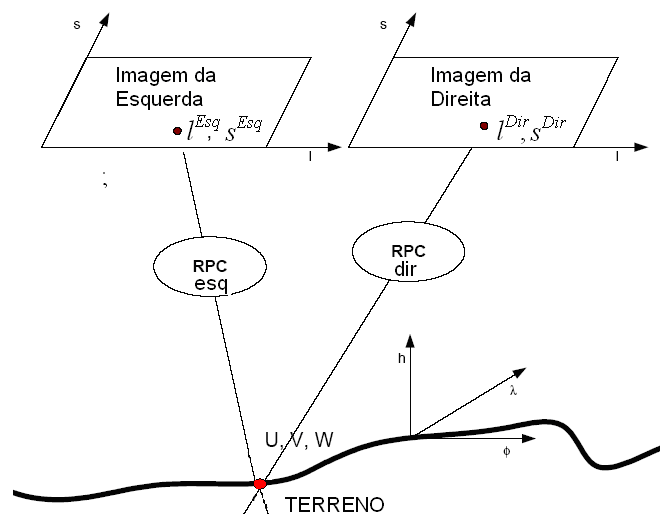


FIGURA 34 – INTERSECÇÃO ESPACIAL COM RFM  
FONTE: Adaptado de Grodecki (2001)

#### 2.3.2.1.1. Pré-refinamento com modelo RFM (RPC)

Conforme descrito por Fraser, Dial e Grodecki (2006), a calibração de um sistema sensor é controlada e determinada com alta precisão, além dos parâmetros de orientação exterior, que são observados diretamente a partir de um sistema GPS integrado com eficiente sistema inercial e de rastreamento de estrelas. No entanto,

ambas determinações estão sujeitas a erros. Por exemplo, a exatidão posicional do satélite IKONOS II é de aproximadamente 1m e a de atitude varia de 1 a 2 segundos. Erros da ordem de 2 segundos nos ângulos de guinada e/ou de rolagem podem ocasionar deslocamentos no terreno de até 6,5m nas imagens. Como consequência essas imprecisões dos parâmetros de calibração e de posição e atitude da plataforma podem incorporar imprecisões nos RPC que resulta na determinação imprecisa de coordenadas de terreno, geradas diretamente a partir da utilização somente desses coeficientes.

Desta forma, o processo de intersecção espacial com a RFM, descrito na seção 2.3.2.1, pode ser realizado sem a utilização pontos de controle, diretamente a partir dos coeficientes RPC e das coordenadas de imagem de pontos homólogos presentes no estereomodelo. No entanto, conforme descrito anteriormente, torna-se necessário um refinamento no processo a fim de se obter uma maior exatidão na determinação de coordenadas tridimensionais. O refinamento deve ser realizado com o objetivo de corrigir ou eliminar os problemas de erros sistemáticos nas imagens (*bias compensation*).

Uma prática bastante utilizada para correção do efeito sistemático é expandir o modelo RFM, apresentado nas Equações 18, da seguinte forma:

$$l + dl = \frac{P_1(U, V, W)}{P_2(U, V, W)} \quad (27)$$

$$c + dc = \frac{P_3(U, V, W)}{P_4(U, V, W)}$$

onde:  $dl$  e  $dc$  podem ser representados por uma transformação Afim Geral, logo:

$$l + A_o + A_1.s + A_2.l = \frac{P_1(U, V, W)}{P_2(U, V, W)} \quad (28)$$

$$c + B_0 + B_1.s + B_2.l = \frac{P_3(U,V,W)}{P_4(U,V,W)}$$

onde  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_0$ ,  $B_1$  e  $B_2$  são os parâmetros da transformação Afim Geral. Conforme descrito por Fraser, Dial e Grodecki (2006), existem três escolhas de configurações dos parâmetros adicionais para o modelo RFM:

- (i)  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_0$ ,  $B_1$  e  $B_2$ , que corresponde a uma transformação afim geral;
- (ii)  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $B_0$  e  $B_1$  que corresponde a uma transformação isogonal; e
- (iii)  $A_0$  e  $B_0$  que representam translações das coordenadas de imagem.

Fraser, Hanley e Yamakawa (2002) realizaram experimentos utilizando a RFM com os RPC sem pontos de apoio e um par estereoscópico IKONOS II para a determinação de coordenadas tridimensionais via intersecção espacial. Os resultados obtidos para o RMS da discrepância das coordenadas XYZ, empregando pontos de verificação foram de 8, 31 e 2 metros em X, Y e Z, respectivamente. No experimento que utilizou somente um ponto de apoio para a correção dos erros contidos nas imagens (*bias compensation*), os resultados dos RMS para as discrepâncias das coordenadas XYZ foram reduzidos para valores próximos de 0,5, 0,6 e 1,0 metro, respectivamente. Os autores comentam ainda que a utilização do modelo RFM com as configurações de parâmetros adicionais (iii) é o suficiente para obtenção de resultados posicionais acurados.

Kurmar (2006, citado por Singh, 2008) realizou experimentos analisando a precisão de Modelos Digitais do Terreno gerados a partir de pares estereoscópicos do satélite Cartosat-1 com os RPC. Em seus resultados utilizando-se os RPC sem pontos de controle, o erro obtido para as coordenadas altimétricas ficou com valores entre 100 e 200 metros e quando utilizou oito pontos de controle esse erro foi reduzido para valores entre 2 e 13 m.

Fraser, Dial e Grodecki (2006) realizaram experimentos com uma série de

pares estereoscópicos (IKONOS e QuickBird) para determinação de coordenadas 3D via intersecção espacial com a RFM utilizando-se os RPC das imagens, fornecidos pelas empresas. A partir dos resultados apresentados para o estereomodelo IKONOS II da região de Yokosuda foi possível observar que no processo de intersecção espacial, utilizando-se a RFM + RPC sem pontos de controle, o RMS para a discrepância nos pontos de verificação apresentou valores de 16, 3 e 3 metros para as coordenadas X,Y e Z, respectivamente. Enquanto que para a mesma imagem, utilizando a RFM + RPC e dois pontos de controle, o RMS para a discrepância das coordenadas X,Y e Z dos pontos de verificação apresentou valores bem próximos de 1,0 *pixel*.

Trabalhos como os de Titarov (2008) e Lehner et al. (2008) utilizaram mesma metodologia proposta por Fraser, Dial e Grodecki (2006) para correção dos erros sistemáticos presentes nos RPC de estereoidades do satélite Cartosat-1. Conforme descrito pelos autores, no processo de extração de informações 3D, diretamente, a partir das estereoidades com os seus RPC foi encontrada precisão planimétrica em torno de 100 m e ao se aplicar uma transformação Afim Geral ao modelo RFM foi possível obter precisão posicional com valores entre 0,5 e 1,0 *pixel*.

Tomás et al. (2010) utilizaram estereoidades IKONOS II e modelagem rigorosa e RFM para avaliação de Modelos Digitais do Terreno geradas com diversas configurações de pontos de controle. Os autores comentam que o experimento, utilizando a modelagem RFM com os RPC e 9 pontos de controle bem distribuídos ao longo do par estereoscópico, foi o que apresentou o menor valor de RMS para a discrepâncias dos pontos de verificação utilizados.

Xiong e Zhang (2011) realizaram experimentos com três imagens IKONOS II com sobreposição (*stereo triplet*) e um par estereoscópico Quickbird para a extração de coordenadas tridimensionais com a utilização do modelo RFM. Os autores afirmam a necessidade de inclusão de pontos de controle para refinar o modelo RFM com uma transformação Afim Geral ou duas translações. Em linhas gerais, os



experimentos com 10 pontos de controle geraram precisões *subpixel* para a intersecção espacial nos pontos de verificação.

#### 2.3.2.2. Transformação Linear Direta (DLT)

A Transformação Linear Direta (DLT) é um modelo matemático muito utilizado para a orientação de imagens orbitais. Foi formulada por Abdel-Aziz e Karara (1971), inicialmente, para calibrar câmaras amadoras (não métricas). De acordo com Mikhail, Bethel e McGlone (2001) a DLT é um modelo matemático derivado da equação de colinearidade. As Equações 29 mostram o modelo matemático da DLT:

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ y &= \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \end{aligned} \quad (29)$$

onde:

$$\begin{aligned} L &= -\frac{1}{(m_{31} \cdot X_C + m_{32} \cdot Y_C + m_{33} \cdot Z_C)} \\ L_1 &= L \cdot (x_0 \cdot m_{31} - c_x \cdot m_{11}) \\ L_2 &= L \cdot (x_0 \cdot m_{32} - c_x \cdot m_{12}) \\ L_3 &= L \cdot (x_0 \cdot m_{33} - c_x \cdot m_{13}) \\ L_4 &= x_0 + L \cdot c_x \cdot (m_{11} \cdot X_C - m_{12} \cdot Y_C - m_{13} \cdot Z_C) \\ L_5 &= L \cdot (y_0 \cdot m_{31} - c_y \cdot m_{21}) \\ L_6 &= L \cdot (y_0 \cdot m_{32} - c_y \cdot m_{22}) \\ L_7 &= L \cdot (y_0 \cdot m_{33} - c_y \cdot m_{23}) \\ L_8 &= y_0 + L \cdot c_y \cdot (m_{21} \cdot X_C - m_{22} \cdot Y_C - m_{23} \cdot Z_C) \\ L_9 &= L \cdot m_{31} \end{aligned} \quad (30)$$

$$L_{10} = L.m_{32}$$

$$L_{11} = L.m_{33}$$

Nas Equações 30,  $c_x$  e  $c_y$ , correspondem à distância focal nos eixos “x” e “y” e  $x_0$  e  $y_0$  correspondem ao deslocamento do ponto principal. Conforme descrito por Mikhail, Bethel e McGlone (2001), esses valores estão em unidades de medida dadas no sistema de coordenadas de imagem (*pixel*).

De acordo com Mikhail, Bethel e McGlone (2001) os parâmetros físicos de uma câmara podem ser derivados dos parâmetros da DLT utilizando-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned}
 L^2 &= L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 \\
 x_0 &= \frac{L_1.L_9 + L_2.L_{10} + L_3.L_{11}}{L^2} \\
 y_0 &= \frac{L_5.L_9 + L_6.L_{10} + L_7.L_{11}}{L^2} \\
 c_x^2 &= \frac{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}{L^2} - x_0^2 \\
 c_y^2 &= \frac{L_5^2 + L_6^2 + L_7^2}{L^2} - y_0^2 \\
 m_{31} &= \frac{L_9}{L} \\
 m_{32} &= \frac{L_{10}}{L} \\
 m_{33} &= \frac{L_{11}}{L} \\
 m_{11} &= \frac{x_0.m_{31} - (L_1 / L)}{c_x} \\
 m_{12} &= \frac{x_0.m_{32} - (L_2 / L)}{c_x} \\
 m_{13} &= \frac{x_0.m_{33} - (L_3 / L)}{c_x} \\
 m_{21} &= \frac{y_0.m_{31} - (L_5 / L)}{c_y} \\
 m_{22} &= \frac{y_0.m_{32} - (L_6 / L)}{c_y} \\
 m_{23} &= \frac{y_0.m_{33} - (L_7 / L)}{c_y}
 \end{aligned} \tag{31}$$

A partir da matriz de rotação, descritas na seção 2.3.2 em conjunto com as Equações 29, 30 e 31 é possível determinar os ângulos de atitude do sensor, logo:

$$\begin{aligned}\varphi &= \text{sen}^{-1}(m_{31}) \\ \omega &= \tan^{-1}\left(\frac{-L_{10}}{L_{11}}\right) \\ \kappa &= \cos^{-1}\left(\frac{m_{11}}{\cos \varphi}\right)\end{aligned}\tag{32}$$

E a posição da câmara é então calculada por:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{pmatrix}\tag{33}$$

É possível observar que a DLT pode ser considerado como sendo uma função RFM com polinômios de primeira ordem e com equações com denominadores em comum. Os coeficientes desse modelo matemático podem ser obtidos diretamente (utilizando-se dos POI e dos POE) ou indiretamente, utilizando pontos de controle.

Ressalta-se ainda que essa abordagem, por relacionar diretamente as coordenadas de imagem com as coordenadas do terreno, torna-se bastante útil e vantajosa quando não se dispõe do modelo físico do sensor, ou seja, não é necessário conhecer a geometria de imageamento (DAL POZ e SCALCO, 2006).

El-Manadili e Novak (1996) realizaram experimentos com dados simulados e com dados reais, visando desenvolver uma nova metodologia que possibilitasse a realização de correções geométricas em imagens do satélite SPOT. Os resultados apresentados pelos autores, com a nova metodologia para retificação de imagens SPOT, foram considerados com precisão adequada à resolução espacial da imagem.

Savopol e Armenakis (1998) aplicaram o modelo matemático da DLT em estereoidimagens IRS-1C (GSD de 5,8 m) para determinar coordenadas 3D pelo

processo de intersecção espacial, em trabalhos de mapeamento topográfico. Apesar dos resultados apresentarem baixa precisão para a componente altimétrica (decorrente da pequena relação Base/Altura), com valores próximos de 30 m, em geral, foram obtidos resultados para os erros planimétricos na ordem de 1(um) *pixel*.

Vozikis, Fraser e Jansa (2003) utilizaram a DLT em imagens IKONOS II para extração de feições tridimensionais e obtiveram exatidões planialtimétricas, determinadas com as discrepâncias tridimensionais calculadas com pontos de verificação, valores compatíveis com a resolução da imagem utilizada em seus experimentos.

Sahin, Bakici e Erkek (2004) desenvolveram uma metodologia com a finalidade de fazer aplicações cadastrais em uma área da Turquia, utilizando imagens do IKONOS II e modelagem matemática DLT. Em seus experimentos, foram realizados comparações entre medições de mapas na escala 1:5.000 (obtidos com Fotogrametria convencional) e medições de ortoimagens geradas com base na DLT. Os resultados obtidos demonstram que as coordenadas planimétricas obtidas a partir das ortoimagens geradas com a DLT apresentaram exatidões compatíveis com as coordenadas da carta 1:5.000. As principais vantagens citadas na metodologia proposta pelos autores, quando comparadas com a Fotogrametria convencional, foram os menores custos e também o menor tempo envolvido no processo.

Uma variação do modelo matemático da DLT, com parâmetros adicionais, foi proposta por Wang (1999) para corrigir a imagem é apresentada na Equação 34.

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} + L_{12} .x.y$$

$$y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$
(34)

Esse modelo foi utilizado por Fraser, Hanley e Yamakawa (2001) para extração de edificações 3D a partir de estereogramas IKONOS II. Nos

experimentos realizados foram obtidos valores de precisão planimétrica próxima de um *pixel*, enquanto que a precisão altimétrica ficou próxima de 1,5 *pixel*. Jubanski e Mitishita (2004) utilizaram esta abordagem para determinação de coordenadas tridimensionais a partir de estereoidades EROS-A. As precisões planimétricas e altimétricas obtidas ficaram próximas de dois *pixel*'s.

Em geral, tanto a DLT como a DLT estendida são modelos simples, práticos e de fácil implementação. Além disso, para a orientação de imagens com esse modelo matemático, o processo necessita de somente seis pontos para solução matemática do sistema de equações envolvida por ajustamento mínimo quadrados (MMQ).

#### 2.3.2.3. Modelo de projeção paralela - APM

De acordo com Lugnani (1987), o modelo matemático de projeção paralela é uma degradação da transformação Afim Geral no espaço ( $R_3$ ), como representada em sua forma matricial,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_5 & A_6 & A_7 \\ A_9 & A_{10} & A_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_4 \\ A_8 \\ A_{12} \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde:

$x, y$  e  $z$ - Coordenadas dos pontos no espaço imagem;

$X, Y$  e  $Z$  – Coordenadas dos pontos no espaço-objeto;

$A_1, A_2, A_3, A_5, A_6, A_7, A_9, A_{10}, A_{11}$  - Parâmetros de escalas nos três eixos, rotações e de não ortogonalidade de eixos;

$A_4, A_8, A_{12}$  - Parâmetros de translação

Considerando o caso particular de projeção central com o centro de projeção deslocado para o infinito, a equação 35, pode ser escrita como apresentado na

Equação 36. Maiores considerações sobre a obtenção matemática da transformação Afim de Projeção paralela, pode ser encontradas em Lugnani, (1987) e Morgan (2004).

$$\begin{aligned}x &= A_1 X_i + A_2 Y_i + A_3 Z_i + A_4 \\y &= A_5 X_i + A_6 Y_i + A_7 Z_i + A_8\end{aligned}\tag{36}$$

onde:  $A_1, A_2, \dots, A_8$  são os coeficientes do modelo matemático.

O modelo de projeção paralela relaciona matematicamente coordenadas do espaço imagem com suas respectivas coordenadas de terreno, utilizando uma pequena quantidade de parâmetros. Esse é uma das características que torna esse modelo matemático bastante prático e atraente para diversos pesquisadores.

Yamakawa e Fraser (2004) comentam que quando não é possível dispor de informações precisas a respeito dos parâmetros físicos dos sensores, a aplicação com modelo APM, para reconstrução 3D a partir de imagens de alta resolução, é uma opção bastante atrativa e interessante. Os autores atribuem ainda, como benefício a modesta quantidade de pontos de apoio necessária para determinar os parâmetros de transformação do modelo matemático.

Pode-se considerar a APM como sendo um caso particular de modelagem matemática baseada em razão de polinômios (RFM), com polinômio de primeira ordem e com denominador igual a um (MORGAN 2004). Este modelo matemático compreende 8 parâmetros por imagem.

De acordo com Yamakawa e Fraser (2004) e Morgan (2004), em imagens orbitais obtidas a partir de sensores lineares, o resultado final para as varreduras fornece diversas imagens (linhas) a partir de uma projeção perspectiva, porém, sob um campo de visada estreito, pode-se considerar, em casos práticos, que a representação da projeção paralela do sensor no terreno seja verdadeira, conforme apresentado na Figura 35.

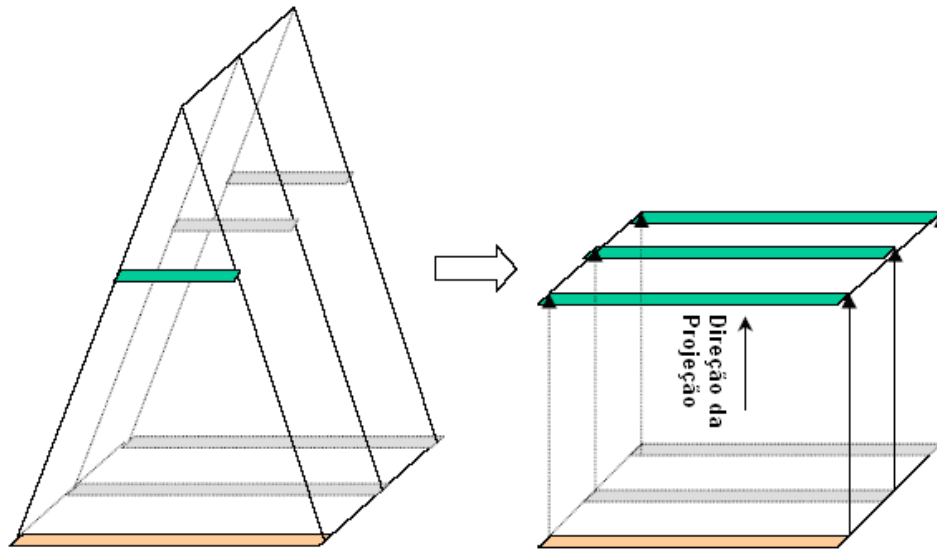


FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO DA PROJEÇÃO PARALELA  
 FONTE: Morgan (2004)

Fraser, Hanley e Yamakawa (2001), realizaram experimentos para determinação de coordenadas 2D e 3D a partir de estereoidimagens IKONOS II com o modelo APM. Os autores recomendam a necessidade de ter medidas na imagem com precisão (*sub-pixel*) e na determinação das coordenadas em campo com GPS precisões (*sub-metre*). Nos experimentos realizados foram obtidos resultados com precisão planimétrica de 0,3m e altimétrica de 0,7m.

## 2.4 CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

De acordo com Merchant (1982), a avaliação da qualidade posicional de produtos cartográficos pode ser realizada em duas fases distintas. A primeira consiste em um teste estatístico, baseado na distribuição “t” *student*, para verificar a existência de tendência, relacionado por exemplo, com a existência de erros sistemáticos nas medidas. A segunda fase é realizada com a distribuição estatística do Qui-quadrado para verificar a precisão das informações obtidas.

### 2.4.1 Análise de tendência

Segundo Galo e Camargo (1994) a exatidão de uma determinada carta é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas na carta ( $X_i$ ) e as referidas coordenadas de referência ( $X_i^r$ ), calculadas para cada ponto “i” e dadas por:

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \quad (37)$$

A média, bem como o desvio padrão das discrepâncias amostrais devem ser estimadas por:

$$\mu_{\Delta X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (38)$$

$$\sigma_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2} \quad (39)$$

onde:  $n$  é o tamanho da amostra

As hipóteses formuladas para o teste de tendência são apresentadas da seguinte forma:

$H_0$ :  $\mu_{\Delta X} = 0$ , contra

$H_1$ :  $\mu_{\Delta X} \neq 0$

A estatística do teste “t” de *Student* é dada por:

$$t_X = \frac{\mu_{\Delta X}}{\sigma_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n} \quad (40)$$

Que tem distribuição “t” de Student com “n-1” graus de liberdade (g.l.).

Se o valor da estatística do teste encontra-se na região de aceitação ou de rejeição da hipótese nula, aceita-se ou rejeita-se  $H_0$ . A região de aceitação da hipótese nula,  $H_0$ , tem a forma:

$$|t_X| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (41)$$

Uma vez que os valores apresentados para a estatística amostral “t” estejam fora da região de aceitação, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a carta não pode ser



considerada com discrepâncias de média nula, para um determinado nível de confiança. Caso contrário, aceita-se a hipótese nula, ou seja, a carta pode ser considerada com média nula (livre de tendência) a um determinado nível de confiança.

Conforme descrito por Galo e Camargo (1994), a existência de tendência em alguma direção indica a ocorrência de problemas (cujas causas podem ser das mais variadas), mas uma vez conhecida, o seu efeito pode ser minimizado pela subtração ou adição de seu valor a cada coordenada “lida” na carta.

A utilização do teste estatístico baseado na distribuição “*t*” de *student* é indicado quando o desvio padrão populacional é desconhecido. Entretanto, quando o objetivo é realizar controle de qualidade de produtos cartográficos, em território nacional, torna-se importante considerar a utilização de documentos que estabelecem normas reguladoras para tais atividades.

No caso do Brasil, as Normas Técnicas da Cartografia Nacional, são estabelecidas pelos artigos 8º e 9º do Decreto Lei 89.917 de 20 de junho de 1984. Segundo esse decreto a exatidão de produtos cartográficos deve obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, podendo ser classificada nas classes A, B ou C, conforme pode-se observar no Quadro 3.

Classe da Carta	Planimetria		Altimetria	
	PEC	EP	PEC	EP
<b>A</b>	0,5 mm na escala da carta	0,3 mm na escala da carta	1/2	1/3
<b>B</b>	0,8 mm na escala da carta	0,5 mm na escala da carta	3/5	2/5
<b>C</b>	1 mm na escala da carta	0,6 mm na escala da carta	3/4	1/2

QUADRO 3 – PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA - PEC

Fonte: BRASIL. Decreto nº 89.917, de 20 de junho de 1984

O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão (EP, equivalente ao desvio padrão).

Nesse contexto, quando se trabalha com a Norma Técnica da Cartografia Nacional, é possível observar a definição do desvio padrão para uma determinada escala, o que possibilita a utilização (alternativa) do desvio padrão “populacional” da classe da carta ao invés de se utilizar o desvio padrão da amostra (NOGUEIRA, 2003).

Sendo assim, o teste estatístico para avaliar a existência de tendência, passa a ser baseado na distribuição normal, ou seja:

$$z = \frac{\mu_{\Delta X}}{\alpha_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n} \quad (42)$$

a região de aceitação da hipótese nula é dada por:

$$|z| < z_{\alpha/2} \quad (43)$$

Logo, se o valor obtido para a estatística amostral “z” estiver fora do intervalo de aceitação, rejeita-se a hipótese nula e a carta não pode ser considerada livre de tendências nas coordenadas dos pontos testados, para um dado nível de confiança.

#### 2.4.2 Análise de precisão

Segundo Galo e Camargo (1994), a análise da precisão pode ser realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o erro padrão esperado (EP), para a classe na qual se deseja testar, segundo o PEC. Logo, o teste a ser formulado para as variâncias é apresentado com as seguintes hipóteses:

$$H_0: \sigma_{\Delta X}^2 = \sigma_{PEC}^2, \text{ contra}$$

$$H_1: \sigma_{\Delta X}^2 > \sigma_{PEC}^2$$

É claro que  $\sigma_{PEC}$  corresponde ao desvio padrão esperado para a coordenada X, ou seja, o erro padrão estabelecido segundo a escala e a classe da carta. Nos trabalhos apresentados por Galo e Camargo (1994), Nogueira (2003) e Galindo (2008) considera-se que o erro padrão seja fixado não para as coordenadas planimétricas (X e Y) isoladas, mas sim para a resultante, sendo portanto necessário a utilização da seguinte formulação:

$$\sigma_{\Delta X} = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (44)$$

A etapa seguinte consiste no cálculo da estatística do teste Qui-quadrado, utilizado para testar a hipótese nula. Essa estatística é dada por:

$$\chi^2_X = (n-1) \cdot \frac{\sigma_{\Delta X}^2}{\sigma_{PEC}^2} \quad (45)$$

Então, se o valor obtido está na região de aceitação da hipótese nula, aceita-se a hipótese. Essa região é dada por:

$$\chi^2_X < \chi^2_{(n-1, \alpha)} \quad (46)$$

Caso a condição anterior não seja atendida, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, o produto cartográfico não atende à precisão estabelecida para a estatística com “n-1” graus de liberdade a um intervalo de confiança “1-α”.

Sobre questões interpretativas do Decreto Lei 89.917 de 20 de junho de 1984, Nero (2005) explica que o teste para a precisão das coordenadas planimétricas, que não é explícito no referido decreto, pode ser realizado para cada coordenada isoladamente (X e Y), com o valor da tolerância definida pelo PEC, ou com a composição das duas coordenadas.

Nero (2005) explica ainda que a norma brasileira, supostamente baseada em Merchant (1982), preconiza o teste isolado para cada coordenada, para efeito da detecção e eliminação de tendências e para o teste de precisão; no entanto, define a exatidão horizontal como a composição das duas e, comenta ainda sobre o CMAS, erro circular padrão de mapas, que prevê a avaliação da composição das coordenadas planimétricas, conforme norma Americana.

A diferença prática entre as duas interpretações para a norma brasileira, de acordo com uma tolerância (PEC) de magnitude “a”, pode ser observada na Figura 36. No teste que compõe as coordenadas planimétricas, o ponto deveria estar dentro de um círculo de diâmetro “2a” para cumprir a norma, já no caso do teste com

as coordenadas isoladas o ponto deveria estar dentro de um quadrado de lado “ $2a$ ”. Nesse caso, o ponto vermelho obedece às especificações em ambas as interpretações, mas o ponto preto apenas à segunda.

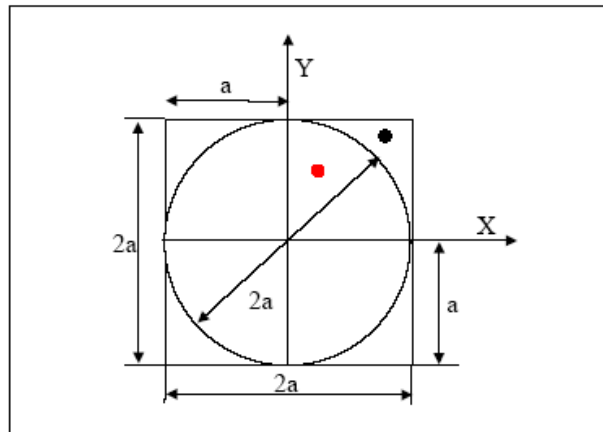


FIGURA 36 – INTERPRETAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PARA PRECISÃO PLANIMÉTRICA COM COORDENADAS ISOLADAS (X E Y) OU A COMPOSIÇÃO (XY)  
FONTE: Nero (2005)

De acordo com Gemael (1994), os erros apresentam comportamento similar ao de uma distribuição normal, caracterizada por uma curva de GAUSS, conforme pode-se verificar na Figura 37. A partir dessa figura é possível observar os diversos intervalos de probabilidade em torno da média, inclusive o intervalo correspondente a 90% de probabilidade, que equivale a 1,6449 do EP, ou desvio padrão.

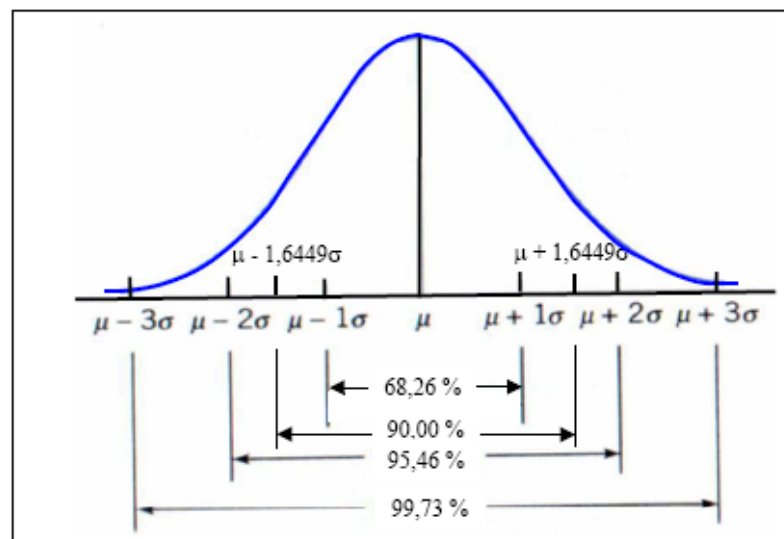


FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL UNIDIMENSIONAL  
FONTE: Nero (2005)

De acordo com Nero (2005), o tratamento para a os testes de precisões,

utilizando-se variáveis unidimensionais está em concordância com a norma brasileira, que preconiza o  $PEC=1,6449*EP$  e diz que 90% dos pontos não devem apresentar erro superior a esse limite. Caso quisesse utilizar a segunda interpretação, a análise seria de uma variável bidimensional (erro circular) e o valor de comparação deveria ser  $PEC=2,146*EP$  (coincidente com o CMAS da norma Americana), que corresponde a 90% (volume abaixo da superfície que representa a probabilidade bidimensional). Dentre várias sugestões para a reformulação da norma brasileira, Nero (2005) comenta sobre a necessidade de deixar claro ao usuário que a análise deve ser efetuada de modo isolado para cada coordenada planimétrica. Nesse contexto a Equação 44 fica reduzida a:

$$\sigma_x = EP \quad (47)$$

Sobre o tamanho da amostra em operações que envolvam o controle de qualidade de produtos cartográficos, Merchant (1982) recomenda que deva-se utilizar, no mínimo, 20 (vinte) pontos de verificação distribuídos por toda carta.

## 2.5 PLATAFORMA IKONOS II PARA AQUISIÇÃO DE ESTEREOIMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO

A extração de informações 3D com base nas imagens orbitais ocorre hoje de maneira bastante prática, difundida e desenvolvida por diversos pesquisadores. Um dos principais motivos e justificativas para tal fato é decorrente do grande avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas em Sensoriamento Remoto e, aliado a isso, a grande gama de estereogramas orbitais que são comercializadas.

Lançado em 24 de setembro de 1999 pela Geoeye (nos Estados Unidos), o satélite IKONOS II (FIGURA 38), foi o primeiro satélite comercial com imagens de alta resolução espacial e capacidade de imageamento de 1 metro. Além de capturar imagens pancromáticas (P&B) com resolução espacial de 1 metro, esse satélite

opera ainda com sensores capazes de registrar imagens no espectro do visível e infravermelho próximo.



FIGURA 38 – SATÉLITE IKONOS II  
FONTE: GEOEYE

Esse sistema está operando desde janeiro de 2000, pela Geoeeye que mantém uma rede de afiliadas (*Space Imaging*) em todo o mundo, e que estão envolvidas na coleta, processamento e comercialização das imagens IKONOS II, fornecendo diversos produtos.

De acordo com Jacobsen (2007), o satélite IKONOS II é equipado com uma combinação de pequenos sensores CCD lineares (FIGURA 39) que geram sub-imagens que, posteriormente, são unidas utilizando-se dados sobre a orientação interna do sistema sensor (FIGURA 40).



FIGURA 39 – PLANO FOCAL DOS Sensores PAN E MS DO SATÉLITE IKONOS II

FONTE: GEOEYE

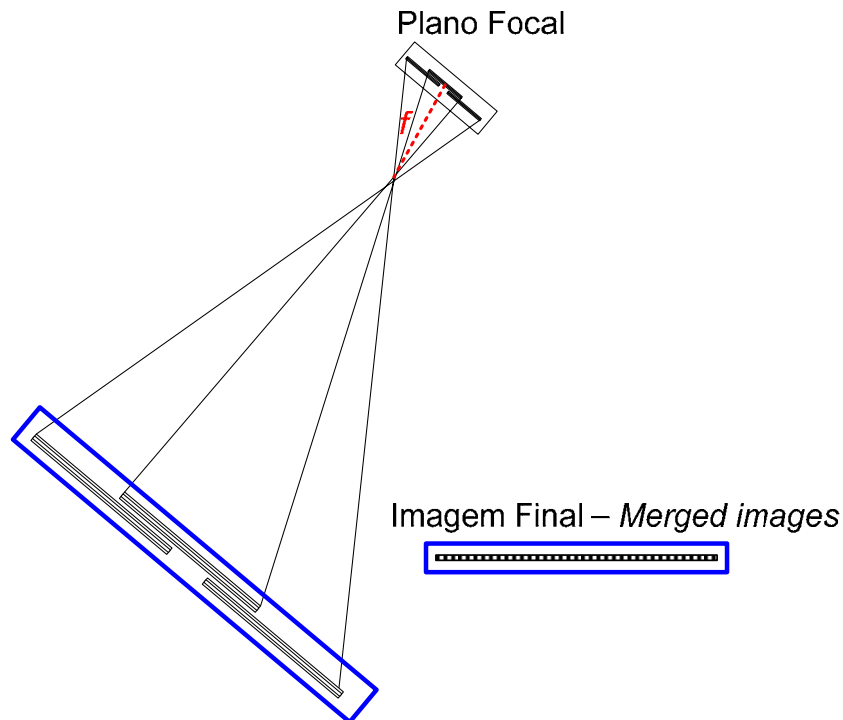


FIGURA 40 – FORMAÇÃO DAS IMAGENS IKONOS II  
FONTE: Adaptado de Jacobsen (2007)

As sub-imagens unidas (*merged images*) são nomeadas pela *Space Image/Geoeye* como imagens originais, porque a imagem original “real” não é disponibilizada para o usuário final. Essas imagens (“originais”) são projetadas para uma superfície de altitude constante (FIGURA 41) e disponibilizadas no modo simples (*single image*), conforme Quadro 4, ou em pares estereoscópicos, conforme Quadro 5.

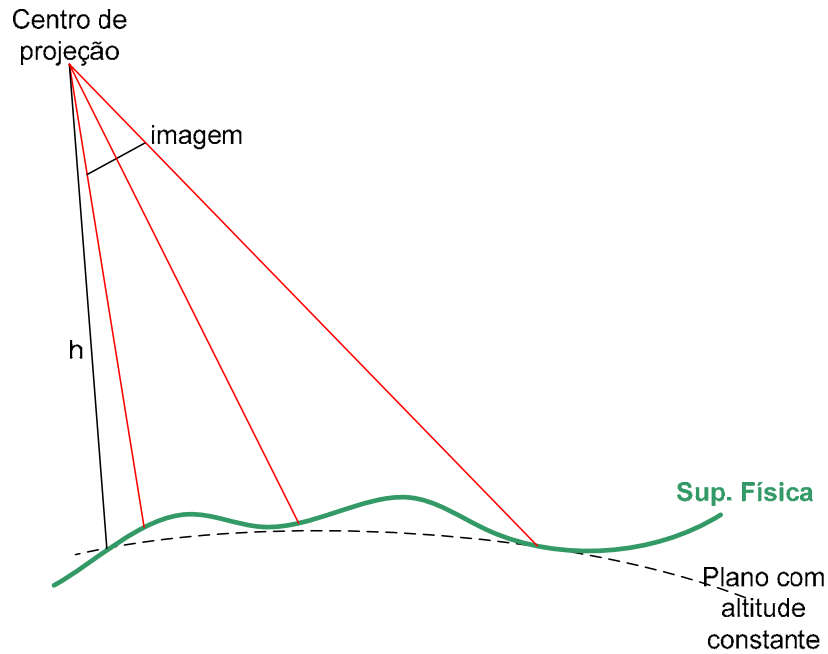


FIGURA 41 – CORREÇÃO DO RELEVO PARA IMAGENS GEO-IKONOS II  
 FONTE: Adaptado de Jacobsen (2007)

Nível do Produto	CE90	RMSE	PEC Classe A (Brasil)	US NMAS (EUA)
Geo	15m*	NA	NA	NA
Reference	25m	11.8	1:50.000	1:50.000
Pro	10m	4.8	1:25.000	1:12.000
Precision	4m	1.9m	1:10.000	1:4.800
PrecisionPlus	2m	0.9m	1:5.000	1:2.400

QUADRO 4 – PRODUTOS IKONOS COMERCIALIZADOS (SINGLE IMAGE)  
 FONTE: SPACE IMAGING BRASIL. [http://www.spaceimaging.com.br/products\\_por.htm](http://www.spaceimaging.com.br/products_por.htm)

Tipo	Nome do produto	Resolução	Precisão nominal de localização
Par Estéreo	REFERENCE STEREO	1 m	Precisão Altimétrica de 22m. Precisão planimétrica de 15m
Par Estéreo	PRECISION STEREO	1 m	Precisão Altimétrica de 5 m. Precisão planimétrica de 4 m.

QUADRO 5 – PRODUTOS ESTEREOPAR IKONOS  
 FONTE: Space Imaging



O Quadro 6 mostra as principais características do sistema IKONOS II.

Altitude	680 km
Inclinação	98,1°
Velocidade orbital	7,5km / s
Sentido da Órbita	Descendente
Duração da Órbita	98 minutos
Tipo de Órbita	Sol-síncrona
Resolução Espacial	<u>No nadir:</u> Pancromática: 0,82m Multiespectral: 3,2m <u>A 26° do nadir:</u> Pancromática: 1,0 m Multiespectral: 4,0 m
Bandas espectrais	Pan 0.45 - 0.90 $\mu\text{m}$
	Azul 0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$
	Verde 0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$
	Vermelho 0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$
	Infra vermelho próximo 0.76 - 0.90 $\mu\text{m}$
Imageamento	13km na vertical (cenas de 13km x 13km)
Frequência de Revisita	Aproximadamente 3 dias (a 1m de resolução)
	<i>Esses valores valem para latitude de +/- 40°. A frequência de revisita para latitudes maiores</i>

QUADRO 6 – ESPECIFICAÇÕES DO SATÉLITE IKONOS II

FONTE: Adaptado de Space Imaging

Uma das grandes vantagens do sensor de alta resolução a bordo do satélite IKONOS II é a capacidade de obter estereoisagens numa mesma órbita (*along-track*) ou a partir de diferentes órbitas. A partir da Figura 42, é possível observar um exemplo de aquisição de imagens estereoscópicas para o sistema a bordo do satélite IKONOS II.

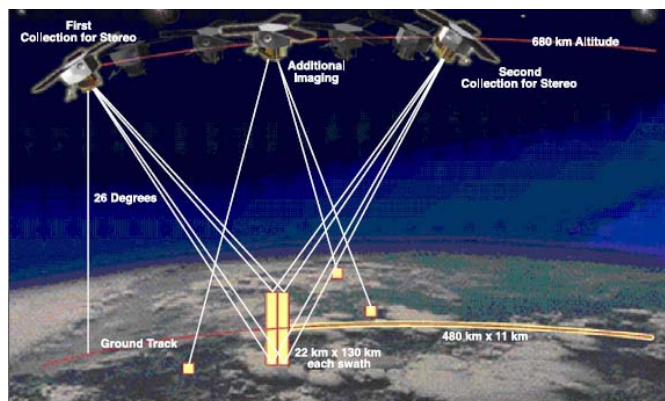


FIGURA 42 – ÓRBITA E FORMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS IKONOS II  
FONTE: Dial et al. (2003)

Trabalhos como os de Dial (2000), Grodecki (2001), Grodecki e Dial (2001), Dial et al. (2003), apresentam resultados para a orientação de imagens IKONOS II, com base em modelos de polinômios racionais. Nos experimentos apresentados foram utilizados os coeficientes (RPC's) do polinômio para avaliar a precisão na correção geométrica das imagens IKONOS II. Além da abordagem utilizando-se dos coeficientes disponibilizados com as imagens, foi implementado algoritmo para determinar os coeficientes por meio de pontos de controle no terreno, demonstrando uma limitação decorrente da forte correlação entre os parâmetros do modelo matemático.

Fraser, Hanley e Yamakawa (2001, 2002) realizaram experimentos com estereogramas IKONOS II para extrair feições tridimensionais, nos quais foi possível observar o potencial da utilização dessas estereogramas na determinação de coordenadas tridimensionais empregando a abordagem com o RPCs, APM e a DLT, apontando uma precisão compatível com a resolução espacial das imagens.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na região metropolitana de Curitiba-PR, no município de Araucária, entre as latitudes 25°32'30"S e 25°37'30"S e as longitudes 49°22'00"W e 49°28'00"W. O tipo de relevo na região de estudo é suave ondulado, com altitudes variando entre 800 e 920 metros. A Figura 43 apresenta a área de abrangência das imagens no município de Araucária que cobre parte da região urbana do município, onde foram realizados os experimentos.

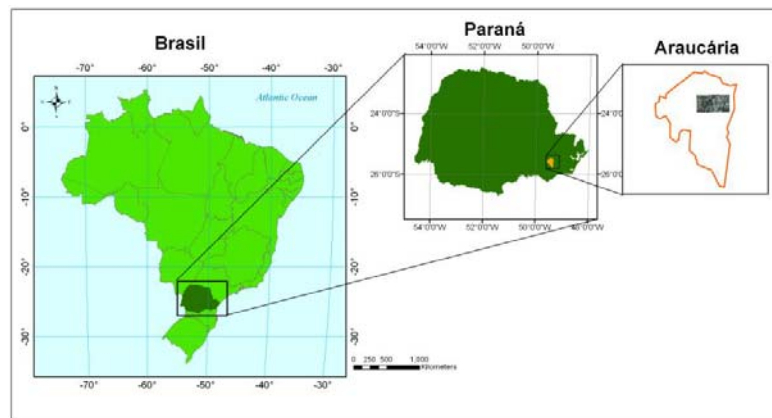


FIGURA 43 – ÁREA DE ESTUDO  
FONTE: O autor (2011)

#### 3.1 IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO

As estereoidimagens IKONOS II utilizadas na presente pesquisa abrangem uma área aproximada no terreno de 50,00 km<sup>2</sup>, com dimensões de cerca de 10 km x 5 km. As principais características dessas imagens são apresentadas no Quadro 7.

	156631-000	156631-001
<b>DATA/HORA</b>	2004-11-23 13:42 GMT	2004-11-23 13:41 GMT
<b>AZIMUTE DO SENSOR</b>	239°21'57,96"	357°07'23,52"
<b>ELEVAÇÃO DO SENSOR</b>	80°45'09,504"	65°08'28,932"
<b>AZIMUTE SOLAR</b>	79°35'58,92"	79°47'0,06"
<b>ELEVAÇÃO SOLAR</b>	70°25'19,38"	70°14'12,552"
<b>DIMENSÕES (PIXEL)</b>	10164x5104	10164x5104

QUADRO 7 – DADOS DAS IMAGENS IKONOS II.  
FONTE: O autor (2011)

As imagens utilizadas (par estereoscópico) possuem correção geométrica padrão (*Standard Geometrically Corrected*), reamostradas na projeção cartográfica UTM, com altitude média de referência no valor de 907,967m referenciadas ao *datum* WGS-84 e recortadas nas dimensões aproximadas descritas no Quadro 7. O nome do produto, segundo a empresa Geoeye, é o *Reference Stereo*, com precisão nominal planimétrica e altimétrica de 15 e 22 metros, respectivamente. Maiores informações sobre os pares estereoscópicos utilizados podem ser visualizadas no Anexo A.

Para verificar a precisão planimétrica nominal, dada pela empresa geradora do produto, foram utilizados vinte e cinco pontos de verificação, distribuído por toda a região de abrangência da imagem conforme apresentado na Figura 44. As coordenadas planas medidas nas imagens foram comparadas com as coordenadas obtidas por levantamento GPS. Com as discrepâncias planimétricas calculadas foi determinada a exatidão planimétrica do produto. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1, Figuras 45 e 46.

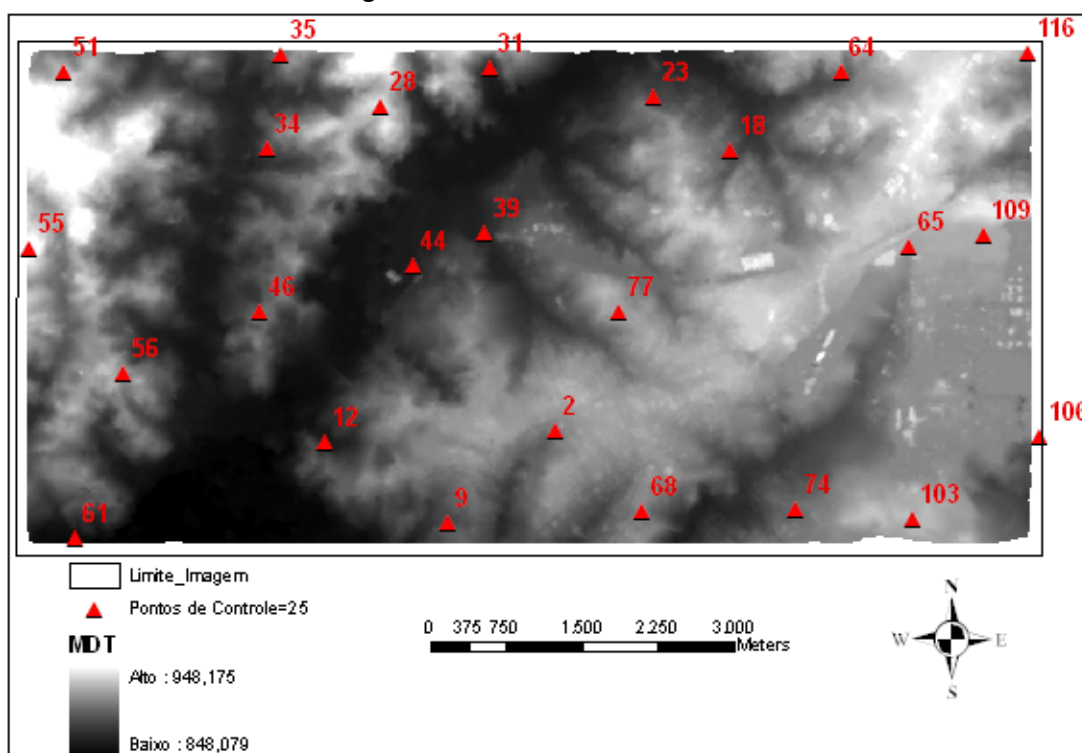


FIGURA 44 – PONTOS DO LEVANTAMENTO GPS NA ÁREA DE ESTUDO  
FONTE: O autor (2011)

TABELA 1 – DISCREPÂNCIA ENTRE COORDENADAS DE IMAGEM E GPS.

Ponto	Discrepâncias (m)		Discrepâncias (m)	
	Imagem 1		Imagem 2	
	E(GPS)-E(I)	N(GPS)-N(I)	E(GPS)-E(I)	N(GPS)-N(I)
2	0,344	5,931	-1,819	-1,506
9	3,178	8,473	-0,619	-7,056
12	5,385	8,181	-0,919	-16,747
18	2,303	6,546	0,166	-5,865
23	2,759	6,392	-1,888	-9,280
28	-1,096	3,366	-0,727	8,102
31	4,352	7,559	-1,574	-14,530
34	2,165	5,773	-1,406	-8,234
35	1,556	5,963	-2,081	-5,856
39	4,023	8,046	-0,828	-15,670
44	5,451	8,930	0,179	-16,682
46	1,206	5,551	-0,350	-5,065
51	-7,538	-7,357	-6,755	-3,793
55	-3,993	3,401	-1,700	12,825
56	-1,312	3,882	-1,761	0,827
61	5,024	7,273	-1,816	-20,820
64	0,404	5,859	-2,062	-1,763
65	-0,988	4,580	-0,625	2,600
68	0,109	6,168	-2,522	-2,601
74	0,290	5,502	-2,354	-3,088
77	-0,455	5,520	-1,206	2,276
103	-2,181	3,309	-2,001	5,448
106	0,700	6,203	-1,357	-1,640
109	-2,568	5,457	-1,921	5,364
116	-1,538	4,495	-1,698	3,612
$\mu$	0,703	5,400	-1,586	-3,966
$\sigma$	3,094	3,085	1,303	8,433
RMSE	3,479	6,918	2,276	10,247

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados obtidos verifica-se a existência de tendenciosidade na componente Norte para as duas imagens do par, porém com sentidos opostos. Na direção E não se observa a existência de tendências significativas nas discrepâncias obtidas, como a encontrada nas discrepâncias em N. Por outro lado, a exatidão planimétrica do produto possui qualidade superior ao valor nominal dado pela empresa que comercializa as imagens.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 1 e gráfico de vetores apresentados na Figura 45, é possível verificar na imagem 1 que os valores de discrepâncias na direção “Este” são maiores que os valores obtidos na imagem 2. Além disso, verifica-se que os pontos 51, 55, 56, 103, 109 e 116, localizados nas



### 3.2 EQUIPAMENTOS E RECURSOS UTILIZADOS

Os recursos e os equipamentos disponibilizados para processamento dos dados da pesquisa foram os seguintes:

- Computador Pentium IV, com processador de 2,4 Ghz, com disco rígido de 80Gb, 2Ghz de memória RAM e monitor de 17”;
- Notebook Acer 15”, com processador Intel Core 2 Duo T7300 de 2,0GHz e disco rígido de 250Gb, 3GB de memória RAM;
- Envi, para Processamento Digital das Imagens;
- *Software* ArcGis –Utilizado para elaboração do croqui para levantamento dos dados em campo e também elaboração dos *layout's* da área de estudo;
- Matlab – Utilizado para desenvolvimento dos aplicativos;
- Par de receptores GPS de dupla frequência Leica 1200 com sistema de rádio para levantamento RTK, disponibilizado pelo Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG);

### 3.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Sendo o principal objetivo desse trabalho de pesquisa o de avaliar o desempenho de modelos matemáticos aproximados e rigorosos para orientar um par de estereoidimagens de alta resolução, IKONOS II, visando a geração de coordenadas tridimensionais pelo processo de intersecção espacial, a metodologia foi dividida nas etapas de trabalho conforme o esquema apresentado na Figura 47.

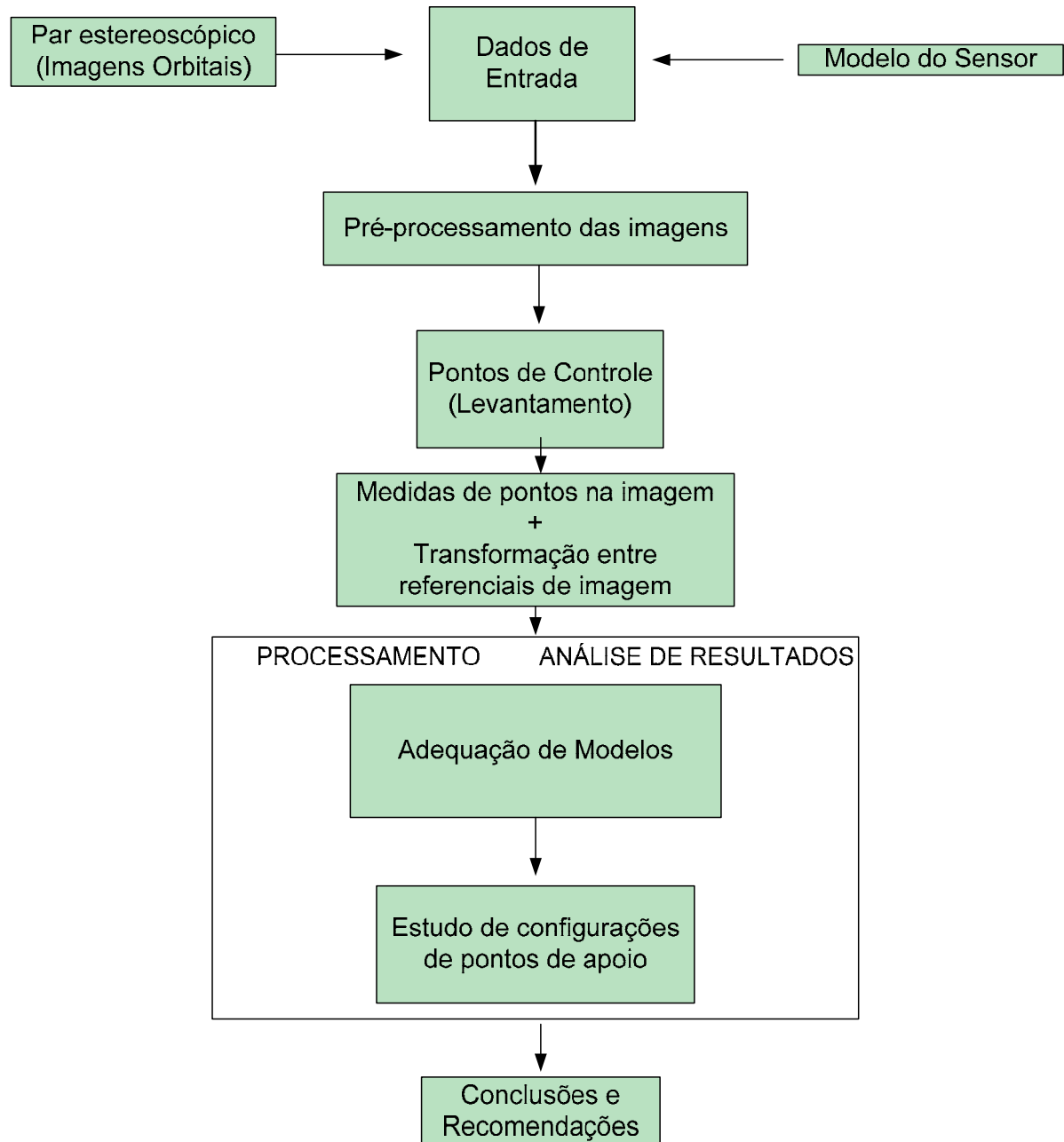


FIGURA 47 – ESQUEMA DE ATIVIDADES DA METODOLOGIA PROPOSTA  
FONTE: O autor (2011)

A metodologia proposta engloba a preparação dos dados de entrada, com o levantamento dos dados de imagem, levantamento de pontos de apoio e verificação no terreno, medidas de pontos de apoio e verificação nas imagens, desenvolvimento e codificação dos aplicativos que envolvem os modelos matemáticos aproximados e rigorosos testados, o processamento dos dados que avaliam a adequação dos modelos testados frente aos experimentos propostos com diferentes variações na



quantidade e geometria de distribuição dos pontos ao longo das imagens, o controle de qualidade dos resultados obtidos e por último, as avaliações e conclusões a respeito dos resultados encontrados.

### 3.3.1 Dados de entrada

Os dados de entrada, necessários para a realização pesquisa proposta, são compostos pelas imagens orbitais (par estereoscópico), pelos parâmetros do sistema sensor (distância focal, tamanho do pixel e coeficientes da RFM) e pelas coordenadas de terreno dos pontos de controle e dos pontos de verificação, obtidas do levantamento GPS.

As estereoidimagens IKONOS II, foram adquiridas no modo *Reference Stereo*, com quatro bandas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) no formato *Geotiff*, obtidas de duas visadas do sensor durante uma única passagem, ou seja, ao longo de uma mesma órbita (*along-track*), conforme especificações dadas no Quadro 7, descrito na Seção 3.1. Os coeficientes do modelo RFM (os RPCs) podem ser visto no Anexo B.

Os parâmetros do sistema sensor, tais como a dimensões do *pixel* e a distância focal foram obtidos do catálogo de informações das imagens, disponível no sítio da Geoeye. Nesse catálogo não se tem as coordenadas do ponto principal e nem mesmo, os coeficientes que modelam as distorções (radial simétrica e descentrada). Portanto, essas correções foram desconsiderados no cálculo das coordenadas de imagens.

### 3.3.2 Pré-Processamento das Imagens

Essa é uma importante etapa a ser considerada nos trabalhos que envolvem a extração de informações a partir de imagens digitais e que consiste, nessa pesquisa, basicamente, na geração de composições coloridas das estereoidimagens e

processamento de contraste para o destaque de feições de interesse.

A geração da composição colorida do par estereoscópico foi necessária pois as três bandas do visível foram disponibilizadas em arquivos separados de tons de cinza e segundo Gonzales e Wood (2005), o ser humano possui vantagens na visualização e interpretação de imagens coloridas, pois nessas, o sistema visual humano pode discernir milhares de tons e intensidades de cores e nas pancromáticas, apenas duas dezenas de tons de cinza.

As composições coloridas do par estereoscópico foram obtidas a partir de processamento utilizando-se *software* ENVI. Em seguida, efetuou-se o processamento do contraste nas bandas R, G e B. Extratos das imagens provenientes desses processamentos são apresentados na Figura 48.



FIGURA 48 – EXEMPLO DAS BANDAS R, G E B E A COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB-321  
FONTE: O autor (2011)

As operações de aumento de contraste das três bandas espectrais utilizou-se de somente operadores lineares e teve como principal objetivo o de realçar os principais tipos de feições pontuais presentes no par estereoscópico, visando facilidades operacionais na identificação de alvos no processo de medidas.

A Figura 49 mostra um pequeno trecho de uma das estereoisagens em sua configuração original e sua respectiva imagem realçada. Nessa imagem, é possível verificar que a utilização desse procedimento permitiu melhor identificação das feições pontuais existentes na imagem.



FIGURA 49 – (A) IMAGEM ORIGINAL E (B) IMAGEM COM AUMENTO LINEAR DE CONTRASTE  
FONTE: O autor (2011)

Após a geração das composições coloridas realçadas e escolha dos detalhes pontuais a serem utilizados como pontos de apoio e verificação, foi gerado um croqui individual de cada detalhe, com informações posicionais e de acesso para facilitar a localização dos mesmos no processo de levantamento de coordenadas geodésicas via levantamento de campo GPS.

### 3.3.3 Levantamento de campo

Vinte e cinco pontos de apoio e vinte pontos de verificação foram escolhidos em detalhes visuais de fácil identificação nas imagens e que permitissem fácil localização e acesso no terreno. A escolha do detalhe na imagem foi definida, primeiramente, priorizando-se feições localizadas ao nível do solo e, que apresentassem um contraste que facilitasse sua identificação e medida nas imagens. Entretanto, em regiões onde não foi possível a determinação de feições ao nível do solo, cantos de edificações foram utilizados.

Em procedimentos que envolvem análises de exatidões entre determinado produto cartográfico efetuam-se comparações entre as coordenadas desse produto cartográfico com as respectivas coordenadas obtidas a partir de uma base (referência), e por recomendação (MERCHANT, 1982), os pontos de referência devem possuir precisão três vezes melhor que a precisão das coordenadas avaliadas. No processo de orientação exterior de um par estereoscópico isso não é diferente e as coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio devem apresentar exatidões superiores ao GSD da imagem. Para tanto, um par de receptores GPS

que permite o posicionamento preciso em tempo real (*Real Time Kinematic* -RTK), foi utilizado no levantamento em campo, possibilitando a obtenção de precisões centimétricas nas coordenadas tridimensionais determinadas e economia considerável de tempo de ocupação em cada ponto. A Figura 50 mostra exemplos de detalhes pontuais definidos como pontos de apoio ou verificação, utilizados nessa pesquisa.



FIGURA 50 – EXEMPLO DE PONTOS COLETADOS PARA OS EXPERIMENTOS  
FONTE: O autor (2011)

#### 3.3.4 Medida de pontos na imagem

A operação de medidas de pontos no espaço-imagem pode ser realizada com o auxílio de diversos programas comerciais ou de acesso livre. Entretanto, nesse trabalho foi desenvolvida uma rotina para a leitura manual, com base no programa Matlab, para a obtenção de coordenadas de imagem com resolução no nível do *sub-pixel*. O programa possui recursos para o usuário, de forma interativa, informar o código do ponto, aumentar ou diminuir a escala de visualização da imagem, ir para qualquer região da imagem e medir manualmente o detalhe pontual requerido. A identificação e a coordenada de imagem do ponto são automaticamente armazenadas num arquivo TXT no instante que o ponto é lido.

O referencial empregado no processo de medida, como em outros

programas desenvolvidos para essa atividade, foi o referencial de imagem em *pixel* que tem orientação levógira, com o eixo x orientado para colunas e y orientado para linhas. A origem do referencial foi o canto superior esquerdo, de forma que o centro do primeiro pixel da imagem terá coordenadas nas componentes x e y iguais a 0,5 e 0,5 pixels, respectivamente, conforme pode-se observar na Figura 51.

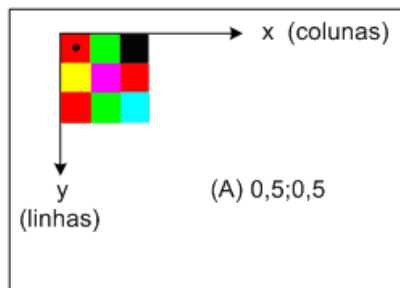


FIGURA 51 – REFERENCIAL DE IMAGEM LEVÓGIRO COM ORIGEM NO CANTO ESQUERDO SUPERIOR DO PRIMEIRO PIXEL  
FONTE: O autor (2011)

O conhecimento da posição da origem do referencial de medida e a possibilidade de realização da leitura com resolução ao nível do sub-pixel foram as principais motivações para o desenvolvimento da rotina de leitura de pontos, pois apesar de ser uma etapa extremamente simples, o não conhecimento da posição exata da origem do referencial, na etapa de transformação entre referenciais de imagem acarretará uma perda de exatidão das medidas realizadas. Igualmente pode ser considerado o caso de programas que não realizam leitura com resolução ao nível do sub-pixel.

#### 3.3.4.1. Transformação entre referenciais de imagem

Conforme apresentado na Seção 2.3.2, a utilização de modelos matemáticos como a DLT e APM em aplicações que envolvem transformações entre referenciais da imagem para o terreno, as coordenadas de imagem poderão ser utilizadas, quase que sempre em sua forma original (linha e coluna), pois, nesses modelos existem parâmetros que absorvem as diferenças de escalas, reflexões e orientações entre os referenciais envolvidos. Entretanto, para o caso das equações de colinearidade,

empregadas nos modelos rigorosos, a transformação das medidas realizadas no referencial dado em pixel para o referencial dextrógiro em milímetro, conforme mostrado na Figura 52, é condição fundamental, pois não existirão parâmetros no modelo que absorvam a reflexão entre referenciais envolvidos. Sendo assim, para a transformação de coordenadas do sistema de imagem (*pixel*) para o sistema em “mm” é necessário o conhecimento do número total de células no sensor linear CCD e o tamanho efetivo do pixel (em milímetros). A transformação entre os referenciais de imagem mencionados, é realizada pela Equação 48.

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= \left\{ Col_i - \left[ \frac{ntotcol}{2} \right] \right\} * tp \end{aligned} \quad (48)$$

sendo:

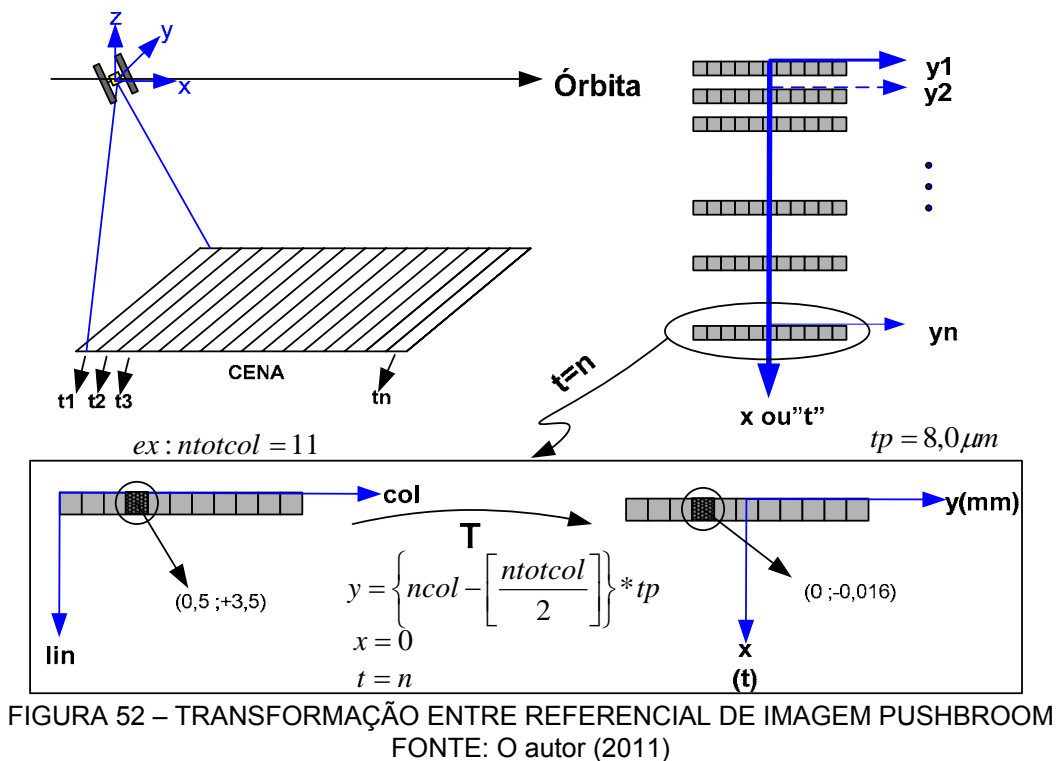
(*y, x*) = coordenadas de imagem no referencial de imagem em milímetros;

*Col<sub>i</sub>* = coordenada de imagem (*pixel*);

*ntotcol* = nº total de células no sensor linear CCD;

*tp* = tamanho efetivo do pixel (dado em “mm”).

A Figura 52 mostra um exemplo desta transformação, considerando um sensor linear com 11 pixels com célula de dimensão física igual a 8,0 micrometro. Reafirma-se aqui que na presente pesquisa não foram considerados erros inerentes às deformações da imagem relacionadas com o processo de aquisição via sensores *pushbroom*, como descrito por Poli (2005).



Sendo o eixo  $x$  do referencial em milímetros orientado para o sentido de deslocamento da plataforma e coincidente com a direção de formação da imagem que se dá de forma linear em sistema de varredura *pushbroom*, a coordenada  $x$  é assumida como sendo igual a zero, pois cada linha é considerada como sendo uma imagem isolada e o *pixel* é considerado como sendo um ponto.

### 3.3.5 Processamentos e análises de resultados

Nessa etapa de trabalho são realizados processos que permitem avaliar o desempenho dos modelos aproximados e rigorosos empregados nessa pesquisa para a orientação do par estereoscópico IKONOS II e determinação de coordenadas tridimensionais de pontos. Para tanto os seguintes procedimentos foram empregados:

- Adequação de modelos;
- Estudo de configuração de pontos de apoio.

#### 3.3.5.1. Adequação do modelo

Nesta fase será verificada a adequação dos modelos aproximados e rigorosos para fins de orientação e extração de informação tridimensional com base num par estereoscópico IKONOS II. Para tanto, os modelos são experimentados com a configuração máxima de pontos de apoio. Como já visto, foram levantados 25 pontos de apoio, distribuídos por toda a região do par, conforme mostrado na Figura 44, da seção 3.1.

No modelo matemático DLT optou-se em utilizar o ajustamento (MMQ) pelo método paramétrico não linear para a determinação dos parâmetros, já que o método linearizado (DAL POZ E SCALCO, 2006), em testes preliminares, não conduziu a resultados satisfatórios para a obtenção das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação via intersecção espacial. Nesse caso o método linearizado será utilizado somente para obtenção dos parâmetros aproximados dos coeficientes da DLT, ou seja, tais coeficientes serão utilizados como parâmetros aproximados (valores iniciais) no processo iterativo do ajustamento paramétrico não linear.

Como o modelo APM apresenta-se na forma linear (direta) o método de ajustamento utilizado será o paramétrico linear, sem iterações, assim como o modelo RFM.

Os modelos rigorosos que serão utilizados nessa pesquisa são modelos matemáticos com base na equação de colinearidade, conforme apresentado na seção 2.3.1. Duas foram as configurações de parâmetros escolhidas para realização dos experimentos aqui propostos utilizando-se dessa abordagem rigorosa, a primeira com 9 e a segunda com 12 parâmetros (QUADRO 8). O método que será utilizado para determinação dos parâmetros é o método de ajustamento paramétrico não linear acrescido de injunções de posição.



<b>MR9</b> $\begin{pmatrix} X_s = X_0 + a_1 \cdot t \\ Y_s = Y_0 + a_2 \cdot t \\ Z_s = Z_0 + a_3 \cdot t \\ \kappa_s \\ \varphi_s \\ \omega_s \end{pmatrix}$	<b>MR12</b> $\begin{pmatrix} X_s = X_0 + a_1 \cdot t + b_1 \cdot t^2 \\ Y_s = Y_0 + a_2 \cdot t + b_2 \cdot t^2 \\ Z_s = Z_0 + a_3 \cdot t + b_3 \cdot t^2 \\ \kappa_s \\ \varphi_s \\ \omega_s \end{pmatrix}$
---	--

QUADRO 8 – MODELO RIGOROSOS UTILIZADOS

FONTE: O autor (2011)

Em linhas gerais, a determinação dos parâmetros para todos os modelos matemáticos utilizados é realizada por meio de um ajustamento por mínimos quadrados e desse são obtidos os resíduos das observações, variância *a posteriori* e matriz variância e covariância dos parâmetros, que possibilitam as análises de precisão do ajustamento realizado.

Com os parâmetros determinados, a intersecção espacial é realizada para a determinação de coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação. Com base na comparação dessas coordenadas com as determinadas pelo levantamento de campo GPS, as discrepâncias planialtimétricas são determinadas. Empregando essas discrepâncias, análises estatísticas são realizadas para a determinação das exatidões planimétricas e altimétricas obtidas em cada modelo e enquadramento dessas junto aos valores pré estabelecidos pelo PEC. Por fim, os resultados obtidos nos experimentos realizados permitem concluir sobre o desempenho dos modelos na aplicação realizada.

### 3.3.5.2. Estudo de configuração de pontos de apoio

Esta etapa de trabalho tem por objetivo a realização de experimentos que permitam avaliar o comportamento dos modelos, já testados na etapa anterior, na redução do número de pontos de apoio em diferentes configurações de posicionamento nas imagens. O número de pontos de apoio nas configurações

propostas variam de 6 a 20 pontos, entretanto, modelos que possibilitam menor quantidade de pontos na aplicação, foram testados com outras configurações com menor quantidade de pontos. Em todas as configurações propostas e que permitiram a aplicação do modelo, o ajustamento por mínimos quadrados foi realizado para a determinação dos parâmetros de transformação. A partir desses a intersecção espacial foi realizada para a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação. Tendo as coordenadas calculadas e as determinadas pelo levantamento GPS, as discrepâncias planialtimétricas são obtidas para a determinação das exatidões planimétricas e altimétricas do modelo e configuração de pontos de apoio. Igualmente como realizado na fase anterior, os resultados obtidos de exatidões em cada uma das configurações de pontos de apoio e modelo são aqui também analisados quanto os seus enquadramentos nos padrões de exatidões fornecidos pelo PEC.

Apesar de se ter todos os resultados de precisões, obtidos no ajustamento realizado em cada um dos experimentos, nesta etapa, os mesmos não são apresentados e nem empregados nas análises realizadas que têm por fim a determinação do desempenho dos modelos frente a variação de configuração do número e distribuição de pontos de apoio nas imagens.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversos experimentos foram realizados com objetivo de avaliar o desempenho dos modelos matemáticos rigorosos e aproximados para a realização da orientação de um par de estereogramas de alta resolução, IKONOS II, visando a geração de coordenadas tridimensionais pelo processo de intersecção espacial. Os experimentos foram divididos de acordo com a metodologia proposta nesse trabalho. Os modelos rigorosos utilizados foram os modelos com 9 e 12 parâmetros, descritos na seção 3.3.5.1 e os modelos aproximados foram a Transformação de Projeção Paralela (APM), a Transformação Linear Direta (DLT) e o Modelo de Função Racional (RFM), descritos na seção 2.3.2.

### 4.1 ADEQUAÇÃO DE MODELOS

Como já descrito no item 3.3.5.1 desse trabalho, nesta etapa são realizados experimentos que têm por objetivo a verificação da adequação dos modelos rigorosos e aproximados para fins de orientação e extração de informação tridimensional com base num par estereoscópico IKONOS II. Desta forma, os modelos matemáticos são testados na orientação do par estereoscópico com a configuração de 25 pontos de apoio distribuídos por toda a região das imagens e obtenção de coordenadas tridimensionais de 20 pontos de verificação. Optou-se por essa quantidade de pontos de verificação, mesmo sabendo-se que, em alguns casos, haveria proximidade entre esses pontos e os pontos de controle, como pode ser visto na Figura 53.

Como já mencionado anteriormente, em cada um dos modelos testados, o ajustamento por mínimos quadrados é realizado para a determinação dos parâmetros e posteriormente a análise de precisões resultantes, empregando os resíduos das observações, teste de variâncias *a priori* versus *posteriori* e análises de

precisões dos parâmetros determinados via matriz variância e covariância. Em seguida, conforme metodologia proposta em 3.3.5.1, procedeu-se a análise da exatidão do modelo para a determinação de coordenadas tridimensionais dos pontos via o processo de intersecção espacial.

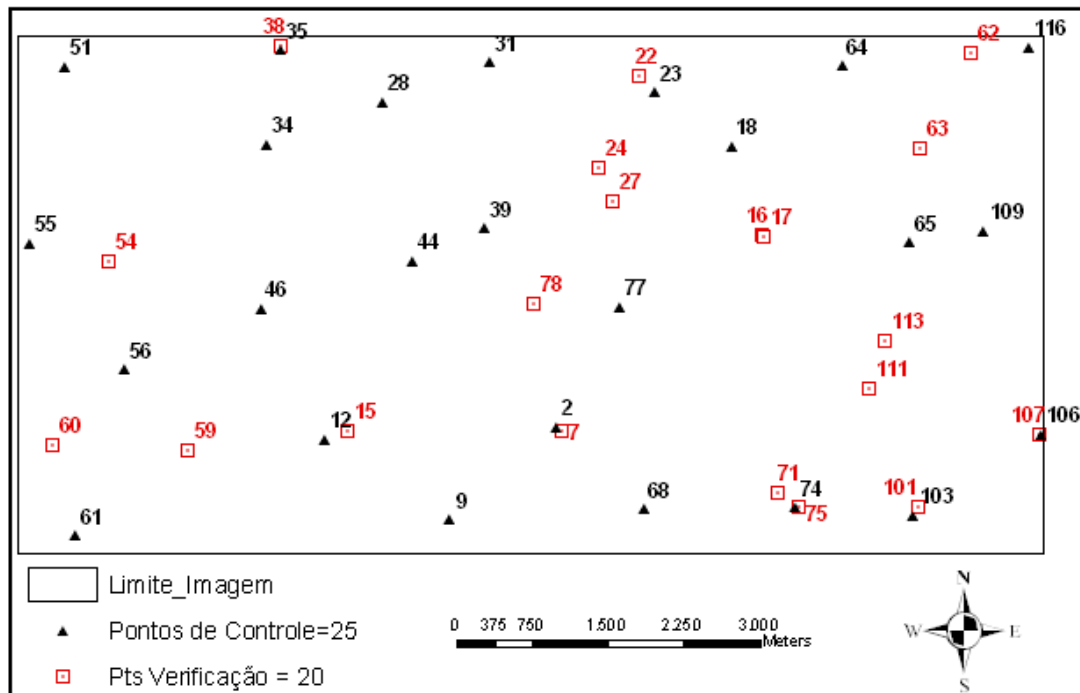


FIGURA 53 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO  
FONTE: O autor (2011)

#### 4.1.1 MR1 – Modelagem rigorosa com 9 parâmetros

Apesar de reconhecer que este tipo de modelo não se aplica para imagens geometricamente corrigidas, nesse trabalho o modelo foi experimentado somente para verificar o seu comportamento na aplicação requerida quando comparado com as transformações aproximadas.

O ajustamento por mínimos quadrados realizado na orientação do par estereoscópico considerou que as observações são não correlacionadas e com precisão de medida igual a um *pixel*. Admitiu-se que as coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio são isentas de erro (variâncias em X, Y e Z iguais a zero), tendo

em vista as precisões obtidas no levantamento GPS serem próximas de 2 centímetros. Assim, injunções de posições absolutas foram empregadas nos 25 pontos de apoio. Os resíduos nas coordenadas de imagem dos 25 cinco pontos de apoio utilizados na orientação do par estereoscópico são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – MR9

código do ponto	IMAGEM 01		IMAGEM 02	
	Vx (pixel)	Vy (pixel)	Vx (pixel)	Vy (pixel)
2	-0,342	1,423	0,261	-0,064
9	-0,326	2,453	-0,294	0,960
12	-0,527	1,502	0,149	-0,070
18	-0,309	1,305	-0,172	0,329
23	-0,297	1,628	-0,251	0,220
28	-0,377	0,901	0,367	-0,034
31	0,772	2,180	0,222	-0,390
34	0,555	0,121	0,458	-0,301
35	0,060	0,710	0,571	-0,139
39	-0,017	1,032	-0,180	0,500
44	-1,009	1,895	-1,008	1,041
46	-0,004	0,292	0,870	0,655
51	0,059	-2,188	-0,773	-0,291
55	-0,327	-3,458	0,000	-0,219
56	0,734	-2,376	-0,582	-0,670
61	0,970	-1,448	-0,158	-0,396
64	-0,333	0,137	0,770	-0,185
65	0,223	-0,402	0,139	1,060
68	-0,208	0,805	0,614	-0,691
74	-0,443	0,167	0,712	-0,927
77	-0,686	1,237	-0,118	0,957
103	0,650	-1,243	-0,290	-0,173
106	0,221	-1,998	-0,058	-0,069
109	0,619	-2,189	-1,201	-0,159
116	0,343	-2,486	-0,048	-0,945
<b>Desvio- padrão</b>	0,508	1,694	0,532	0,585

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2 e tomando se como referência as precisões admitidas para a medidas, verifica-se que o desvio-padrão da média dos resíduos na componente y da imagem 1 encontra-se acima da precisão tolerável, principalmente quando comparado com os valores obtidos para

as outras componentes x e y envolvidas no ajustamento. Verifica-se que resíduos na componente y da imagem correspondem no terreno a discrepâncias no eixo X ou E (Referencial UTM). Analisando-se a Figura 58, verifica-se, no processo de avaliação da precisão planimétrica da imagem via discrepâncias nos pontos de verificação, situados nas bordas da imagem 1, a existência de vetores com direção contrária à grande maioria dos outros vetores. Tal característica leva a inferir a possibilidade de existência de distorção nessa imagem, provocada pelo processo de correção geométrica que o modelo rigoroso com 9 parâmetros não conseguiu absorver. Apesar da menor precisão dos resíduos nas coordenadas da componente y da imagem 1, o teste de igualdade da variância *a priori* com a *posteriori* com base na estatística do Qui-Quadrado, apresentado na Tabela 3, aceita a precisão resultante do ajustamento dentro dos limites toleráveis de precisões admissíveis para um nível de significância de 5%, ou 95% dos resíduos das observações encontram-se dentro do intervalo de aceitação.

TABELA 3 – RESULTADO DO AJUSTAMENTO - MODELO MR9

iterações	$\chi^2_{v, \frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2$	$\chi^2_{v, 1-\frac{\alpha}{2}}$	$\hat{\sigma}_0^2$
6	124,2	160,1	193,58	1,001
POE (t=0)	Parâmetros ajustados	Precisão	Parâmetros ajustados	Precisão
gl=157	<b>IMAGEM 01</b>		<b>IMAGEM 02</b>	
<b>Kapa (rad)</b>	-1,5707353	0,0000501	-1,5705999	0,0000502
<b>Phi (rad)</b>	-0,1188800	0,0103453	-0,0193888	0,0096209
<b>Omega (rad)</b>	0,0823099	0,0086778	-0,4387955	0,0079308
<b>X0 (m)</b>	561771,97	8375,33	643745,27	8011,0
<b>Y0 (m)</b>	7106432,96	7106,815	7527875,342	5982,34
<b>Z0 (m)</b>	819663,05	2128,977	755003,92	2823,45
<b>a1 (m/s)</b>	0,0236249	0,2643013	-0,0265633	0,0491956
<b>a2 (m/s)</b>	-83,309391	0,181862	-83,00754	0,95418
<b>a3 (m/s)</b>	-2,46E-01	2,20E+00	6,85E-01	2,03E+00

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os valores dos parâmetros e suas precisões apresentados na Tabela 3, verifica-se que as precisões obtidas para os parâmetros de posição das imagens encontram-se com valores na ordem de milhares de metros. Essa particularidade está certamente relacionada com a utilização de coordenadas UTM

nos pontos de apoio para a materialização do referencial no terreno, pois Kim et al. (2007) utilizando-se do referencial UTM numa aplicação similar de orientação de estereogramas do satélite SPOT encontraram valores similares de precisões para os parâmetros de posição.

Analisando-se as matrizes de correlação entre os parâmetros de orientação determinadas no ajustamento (Tabelas 4 e 5), verifica-se a existência de diferentes correlações matemáticas entre os parâmetros envolvidos. As correlações entre parâmetros com significado físico, mencionadas em Orun e Natarajan (1994) - " $\phi$ " com " $Y_0$ " e " $\omega$ " com " $X_0$ ", apesar da utilização de imagens reamostradas para um sistema de projeção cartográfica, são ainda verificadas com correlações matemáticas totais. Outras fortes correlações foram observadas, tais como a existente entre " $Z_0$ " e " $\phi$ " na imagem 1 e " $Z_0$ " e " $\omega$ " na imagem 2. A utilização de imagens corrigidas para um sistema de projeção cartográfica pode ser a causa provável dessas últimas correlações. Verifica-se ainda correlações totais entre os parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  que podem ser consideradas como normais pois estão relacionadas com parâmetros obtidos a partir de polinômios de mesmo grau em função da mesma variável para modelar a posição do sensor nos três eixos. Todas as correlações citadas anteriormente causaram grandes instabilidades na resolução do sistema de equações, somente sendo possível a convergência quando bons valores aproximados para os parâmetros foram adotados.

TABELA 4 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS ESTIMADOS – IMAGEM 1 - MR9

	<b>k</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b><math>X_0</math></b>	<b><math>Y_0</math></b>	<b><math>Z_0</math></b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>
<b>K</b>	1,00	0,00	0,15	0,00	-0,15	-0,04	0,00	0,00	0,00
<b><math>\Phi</math></b>	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,02	0,96	0,42	0,42	-0,42
<b><math>\Omega</math></b>	0,15	0,00	1,00	0,00	-1,00	-0,28	0,00	0,00	0,00
<b><math>X_0</math></b>	0,00	<b>1,00</b>	0,00	1,00	-0,02	0,96	0,42	0,42	-0,42
<b><math>Y_0</math></b>	-0,15	-0,02	<b>-1,00</b>	-0,02	1,00	0,25	-0,01	-0,01	0,01
<b><math>Z_0</math></b>	-0,04	<b>0,96</b>	-0,28	0,96	0,25	1,00	0,42	0,43	-0,43
<b><math>a_1</math></b>	0,00	0,42	0,00	0,42	-0,01	0,42	1,00	1,00	-1,00
<b><math>a_2</math></b>	0,00	0,42	0,00	0,42	-0,01	0,43	<b>1,00</b>	1,00	-1,00
<b><math>a_3</math></b>	0,00	-0,42	0,00	-0,42	0,01	-0,43	<b>-1,00</b>	<b>-1,00</b>	1,00

FONTE: O autor (2011)

TABELA 5 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS ESTIMADOS - IMAGEM 2 - MR9

	<b>k</b>	<b><math>\varphi</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>X0</b>	<b>Y0</b>	<b>Z0</b>	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>
<b>k</b>	1,00	0,00	0,16	0,00	-0,16	0,16	0,00	0,00	0,00
<b><math>\varphi</math></b>	0,00	1,00	0,00	1,00	0,02	0,11	0,56	-0,42	-0,42
<b><math>\omega</math></b>	0,16	0,00	1,00	0,00	-1,00	0,99	0,00	-0,01	0,00
<b>X0</b>	0,00	<b>1,00</b>	0,00	1,00	0,02	0,11	0,56	-0,42	-0,42
<b>Y0</b>	-0,16	0,02	<b>-1,00</b>	0,02	1,00	-0,99	0,02	-0,01	-0,02
<b>Z0</b>	0,16	0,11	<b>0,99</b>	0,11	-0,99	1,00	0,07	-0,07	-0,06
<b>a1</b>	0,00	0,56	0,00	0,56	0,02	0,07	1,00	-0,97	-0,97
<b>a2</b>	0,00	-0,42	-0,01	-0,42	-0,01	-0,07	<b>-0,97</b>	1,00	1,00
<b>a3</b>	0,00	-0,42	0,00	-0,42	-0,02	-0,06	<b>-0,97</b>	<b>1,00</b>	1,00

FONTE: O autor (2011)

Orun e Natarajan (1994) recomendam a eliminação das correlações entre os parâmetros “ $\varphi$ ” com “Y0” e “ $\omega$ ” com “X0” fixando os parâmetros “ $\varphi$ ” e “ $\omega$ ” com valores constantes. Tais simplificações foram empregadas, no entanto em experimentos realizados, o processo de intersecção espacial utilizando-se os parâmetros determinados pelo ajustamento aplicado aos pontos de verificação encontrou solução muito abaixo da exatidão requerida.

Empregando-se os parâmetros de orientação exterior do par estereoscópico, apresentado na Tabela 3, realizou-se a intersecção espacial para a determinação de coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação. Essas coordenadas foram comparadas com as obtidas em campo via levantamento GPS. Os valores das discrepâncias planialtimétricas determinadas são apresentada na Tabela 6.

TABELA 6 – DISCREPÂNCIAS PLANIALTIMÉTRICAS NA MODELAGEM RIGOROSA MR9

id do ponto	Discrepâncias (m)		
	E	N	h
7	-1,048	-0,720	-1,693
15	-1,120	-0,426	0,523
16	-0,639	-0,205	-1,051
17	-0,388	0,273	-1,004
22	-0,184	-0,799	-0,514
24	-0,604	-0,187	-0,458
27	-1,036	-0,639	-1,921
38	-0,115	-0,304	-0,876
54	1,500	0,964	-1,037
59	-0,310	0,034	1,862
60	0,923	-0,402	0,080



62	1,868	0,634	-1,160
63	0,696	0,910	-2,439
71	-0,382	0,322	0,379
75	-1,538	0,062	-1,540
78	-1,353	-0,294	0,229
101	0,851	0,700	-0,587
107	1,369	0,237	-1,322
111	0,467	0,895	-3,240
113	0,360	0,172	-2,660
<b>μ</b>	-0,034	0,061	-0,921
<b>σ</b>	0,996	0,553	1,198
<b>RMSE</b>	0,971	0,542	1,487

FONTE: O autor (2011)

Verifica-se na Tabela 6 que os maiores valores de discrepâncias em planimetria encontram-se na componente E. Valores esses que refletem as precisões obtidas nos resíduos das observações na componente y para a imagem 1 e comprovam que o modelo rigoroso não conseguiu parametrizar corretamente as deformações existentes na imagem 1. Os valores obtidos de discrepâncias no eixo N estão de acordo com as precisões obtidas no ajustamento.

A precisão esperada para a componente altimétrica via intersecção espacial é dada com base na equação da paralaxe pela seguinte expressão (WOLF, 2004):

$$dz = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} \cdot d_{px} \quad (49)$$

Para a Equação 49,  $dz$  é a precisão esperada para a componente altimétrica,  $H$  é a altura de vôo,  $B$  a base fotogramétrica,  $f$  a distância focal e  $d_{px}$  é a precisão com que foram obtidas as medidas das coordenadas de imagem. Adotando-se os dados para o par estereoscópico utilizado ( $H=680\text{km}$ ,  $B=340\text{km}$ ,  $f=10\text{m}$ , e  $d_{px}=1,0 \text{ pixel}$ ) resulta em um  $dz$  de, aproximadamente, 1,6 metros. Considerando o valor de precisão média esperada em altimetria na intersecção espacial e comparando-se com o valor da discrepância média absoluta em altimetria, mostrada na Tabela 6, verifica-se que os valores de discrepância altimétrica encontram-se dentro da exatidão esperada para o método utilizado. O valor de precisão altimétrica média tomada como referência, foi determinado em função da base estereoscópica, altura da plataforma, distância focal e um erro posicional de 1 *pixel* na direção x. Desta forma, desconsiderando a deficiência na modelagem das deformações na imagem 1

pode-se afirmar que os resultados obtidos no ajustamento podem ser considerados como sendo perfeitos, pois as precisões obtidas nesse estão refletindo as exatidões obtidas nos pontos de verificação.

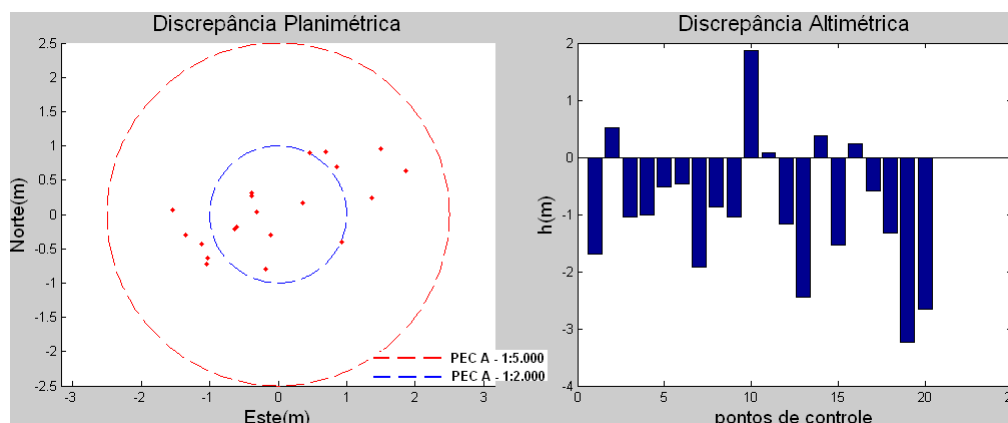


FIGURA 54 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – MR9  
FONTE: O autor (2011)

As exatidões planimétrica e altimétrica obtidas com o modelo MR 9 foram comparadas com as exatidões requeridas na elaboração de mapeamentos cartográficos em diferentes escalas no País (PEC). Uma das formas empregadas para essa avaliação requer que 90% dos pontos de verificação possuam exatidões dentro de um padrão de exatidão. A Figura 54 mostra as discrepâncias planimétricas dentro de dois círculos concêntricos. O círculo na cor azul representa o padrão de exatidão em planimetria para a escala de 1/2000 – classe A e o círculo na cor vermelha o padrão para a escala de 1/5000 – classe A. Conclui-se então que a exatidão planimétrica resultante do experimento encontra-se dentro de valor tolerável no PEC para a realização de mapeamento cartográfico planimétrico na escala de 1/5000 – classe A. No caso altimétrico, foi considerado o padrão de exatidão em altimetria para a escala de 1/5000 – classe A o valor de 1,6449 vezes o erro padrão em altimetria. Usualmente na escala de 1/5000 as curvas de nível possuem equidistância de 5 metros. No caso do PEC, o erro padrão em altimetria corresponde ao valor de 1/3 da equidistância da curva de nível, resultando aqui o valor de 1,666. Assim, 90% das discrepâncias altimétrica não devem possuir erro superior a 2,74 metros. Dessa forma, analisando-se a Tabela 6 e Figura 54 verifica-

se que a exatidão altimétrica obtida no experimento encontra-se dentro de valor tolerável no PEC para a realização de mapeamento altimétrico na escala de 1/5000 – classe A, mesmo com a existência de tendência altimétrica.

As precisões obtidas no experimento foram também avaliadas para o enquadramento no PEC, através de análises estatísticas. Inicialmente, foram efetuadas as análises de tendências dos dados com base no teste estatístico de normalidade e em seguida a análise de precisão por meio do teste do Qui-Quadrado, ambos com 90% de probabilidade. A análise de precisão somente foi realizada na presença de dados normais. Tabela 7 mostra os resultados obtidos nesses testes estatísticos.

TABELA 7– RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA DE 1:5.000 COM MR9

Teste	Coordenadas		
	E	N	h
<b>Tendência</b>			
$\mu_{\Delta X}$ (m)	-0,034	0,061	-0,922
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	0,996	0,553	1,198
$z_{tab}$	1,6449	1,6449	1,6449
$z_{xcalc}$	0,101	0,183	2,47
<b>Tendência</b>	<b>Não</b>	<b>Não</b>	<b>Sim</b>
<b>Teste Precisão</b>			
$\chi^2_{(19,10\%)}$	27,2	27,2	
$\chi^2$	8,372	2,582	
<b>CLASSE</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 7 é possível verificar no teste de tendenciosidade, realizado pela estatística de normalidade dos dados, que o valor amostral “z” nas componentes tridimensionais (E, N e h) possui valor maior que valor teórico ( $z_{tab}$ ) somente na componente altimétrica, indicando a existência de tendência nessa componente. Já a respeito do teste estatístico de precisão do Qui-Quadrado, verifica-se que os valores amostrais, calculados para as componentes planimétricas, são menores que o valor tabelado, o que enquadra as

exatidões planimétrica no valor tolerável no PEC para a realização de mapeamento planimétrico na escala de 1/5000 – classe A.

A tendência na componente altimétrica, facilmente verificada na Figura 54 é comprovada no teste estatístico mostrado na Tabela 7. Apesar dessa tendenciosidade, o valor de precisão obtida encontra-se dentro do limite aceitável pelo PEC, como também dentro do limite de precisão teórica admissível para o processo de intersecção espacial. Duas são as prováveis causas dessa tendenciosidade. A primeira pode ser proveniente das deformações presentes na imagem 1 advindas do processo de correção geométrica que o modelo MR9 não conseguiu parametrizar e a segunda, relacionada com a imprecisão na distância focal utilizada.

Na Figura 55 onde os vetores das discrepâncias planimétricas são graficamente representados, o problema da não modelagem das deformações presentes na imagem 1 fica também evidenciado e confirma que as discrepâncias planimétricas encontram-se, na sua totalidade presentes na direção horizontal da imagem ou direção da componente E, confirmando as deficiências na modelagem das deformações existentes numa das imagens do par estereoscópico.

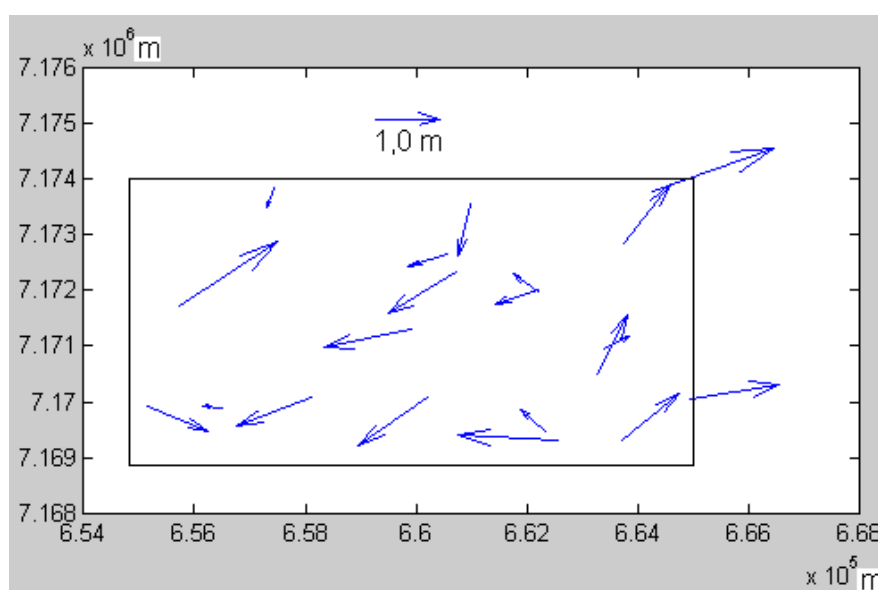


FIGURA 55 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA MR9  
FONTE: O autor (2011)

#### 4.1.2 MR12 – Modelagem Rigorosa com 12 parâmetros

A utilização do modelo rigoroso com 12 parâmetros foi realizada com objetivo de tentar melhorar a modelagem do modelo rigoroso. Apesar da existência de fortes correlações matemáticas encontradas com o modelo MR9, nesse novo modelo, foram adicionados coeficientes no polinômio de 1ª ordem que determina a posição da plataforma no instante da aquisição da linha, modificando o mesmo para o grau de segunda ordem. Esse incremento do número de parâmetros foi realizado na tentativa de melhorar o desempenho do mesmo na parametrização das deformações existentes na imagem 1 do par estereoscópico.

As mesmas precisões adotadas para as medidas no ajustamento realizado com a MR9, como também o número e distribuição dos pontos de apoio, foram aqui mantidas. Analisando os resíduos das observações realizadas nos 25 pontos de apoio, apresentados na Tabela 8, verifica-se que os valores obtidos são menores, mas muito próximos dos valores encontrados no ajustamento realizado com o modelo MR9. Os desvios-padrão nas componentes x e y de imagem mostram o pequeno ganho em precisão obtida com o novo modelo, mostrando que o aumento de parâmetros não permitiu parametrizar as deformações existentes na imagem 1 do par estereoscópico.

TABELA 8 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – MR12

código do ponto	IMAGEM 01		IMAGEM 02	
	Vx (pixel)	Vy (pixel)	Vx (pixel)	Vy (pixel)
2	-0,294	1,335	0,314	-0,229
9	-0,464	2,23	-0,449	1,249
12	-0,483	1,621	0,201	-0,117
18	-0,246	1,267	-0,101	0,126
23	-0,333	1,621	-0,293	0,354
28	-0,430	0,666	0,31	0,001
31	0,670	2,156	0,104	-0,088
34	0,600	0,271	0,508	-0,338
35	-0,097	0,426	0,393	0,114
39	0,141	1,243	-0,002	0,178
44	-0,835	2,208	-0,813	0,741
46	0,145	0,598	1,038	0,445

51	-0,079	-2,525	-0,928	-0,183
55	-0,218	-3,039	0,121	-0,257
56	0,835	-2,095	-0,472	-0,761
61	0,796	-1,914	-0,349	-0,272
64	-0,435	0,189	0,656	0,190
65	0,376	-0,654	0,313	0,386
68	-0,322	0,698	0,484	-0,376
74	-0,546	0,249	0,595	-0,543
77	-0,533	1,127	0,053	0,458
103	0,519	-1,071	-0,441	0,353
106	0,276	-1,918	0,005	-0,273
109	0,766	-2,470	-1,033	-0,860
116	0,192	-2,217	-0,214	-0,297
$\sigma$	0,492	1,677	0,514	0,470

FONTE: O autor (2011)

Igualmente como foi obtido no ajustamento realizado com a MR9, o teste de variância *a priori* com a *posteriori* foi realizado neste experimento e é apresentado na Tabela 9, confirmando que os resíduos encontram-se dentro das precisões toleráveis. As precisões obtidas na determinação dos parâmetros são praticamente iguais as obtidas com o modelo MR9.

TABELA 9 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DO MODELO MR12

Iterações	$\chi^2_{v,\frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2$	$\chi^2_{v,1-\frac{\alpha}{2}}$	$\hat{\sigma}_0^2$
6	118,87	151,19	186,91	1,001
POE (t=0)	<b>Parâmetros ajustados</b>	<b>Precisão (<math>\sigma</math>)</b>	<b>Parâmetros ajustados</b>	<b>Precisão (<math>\sigma</math>)</b>
gl=151	<b>IMAGEM 01</b>		<b>IMAGEM 02</b>	
<b>kapa</b>	-1,5707321	0,0000498	-1,5705960	0,0000500
<b>phi</b>	-0,1130638	0,0109409	-0,0185754	0,0101696
<b>omega</b>	0,0830132	0,0086501	-0,4380318	0,0079049
<b>X0</b>	566497,204	8883,489	644423,24	8468,27
<b>Y0</b>	7105770,791	7092,75	7527286,15	5964,66
<b>Z0</b>	820651,268	2125,87	755246,52	2808,803
<b>a1</b>	-1,1739713	0,8589519	-0,1214028	0,1573586
<b>a2</b>	-84,147625	0,645435	-79,43537	3,31724
<b>a3</b>	1,01E+01	7,68E+00	8,25E+00	7,08E+00
<b>b1</b>	2,12E-02	1,43E-02	1,68E-03	2,44E-03
<b>b2</b>	1,49E-02	1,09E-02	-6,17E-02	5,63E-02
<b>b3</b>	-0,183709174	0,129980699	-0,130690423	0,120271839

FONTE: O autor (2011)

As mesmas correlações entre parâmetros de orientação e posição existentes no modelo MR9 se mantiveram no ajustamento realizado com o modelo MR12. Os

valores dessas correlações são apresentados nas Tabelas 10 e 11. Essas correlações também confirmam a igualdade do desempenho do modelo na aplicação realizada.

TABELA 10 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ESTIMADOS - IMAGEM 1- MR12

	k	$\varphi$	$\omega$	X0	Y0	Z0	a1	a2	a3	b1	b2	b3
k	1,00	0,00	0,15	0,00	-0,15	-0,04	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,00
$\varphi$	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,02	0,96	-0,07	-0,20	0,20	0,20	0,32	-0,32
$\omega$	0,15	0,00	1,00	0,00	-1,00	-0,28	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,14	0,00
X0	0,00	<b>1,00</b>	0,00	1,00	-0,02	0,96	-0,07	-0,20	0,20	0,20	0,32	-0,32
Y0	-0,15	-0,02	<b>-1,00</b>	-0,02	1,00	0,26	0,00	0,14	0,00	0,00	-0,15	0,01
Z0	-0,04	<b>0,96</b>	-0,28	0,96	0,26	1,00	-0,04	-0,12	0,16	0,16	0,24	-0,29
a1	0,00	-0,07	0,00	-0,07	0,00	-0,04	1,00	0,98	-0,99	-0,96	-0,92	0,93
a2	-0,02	-0,20	-0,13	-0,20	0,14	-0,12	0,98	1,00	-0,99	-0,96	-0,96	0,95
a3	0,00	0,20	0,00	0,20	0,00	0,16	-0,99	-0,99	1,00	0,97	0,95	-0,96
b1	0,00	0,20	0,00	0,20	0,00	0,16	-0,96	-0,96	0,97	1,00	0,98	-0,99
b2	0,02	0,32	0,14	0,32	-0,15	0,24	-0,92	-0,96	0,95	0,98	1,00	-0,99
b3	0,00	-0,32	0,00	-0,32	0,01	-0,29	0,93	0,95	-0,96	-0,99	-0,99	1,00

FONTE: O autor (2011)

TABELA 11 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS ESTIMADOS - IMAGEM 2- MR12

	k	$\varphi$	$\omega$	X0	Y0	Z0	a1	a2	a3	b1	b2	b3
k	1,00	0,00	0,17	0,00	-0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\varphi$	0,00	1,00	0,00	1,00	0,02	0,10	0,40	0,19	0,19	-0,25	-0,32	-0,32
$\omega$	0,17	0,00	1,00	0,00	-1,00	0,99	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,00
X0	0,00	<b>1,00</b>	0,00	1,00	0,02	0,10	0,40	0,19	0,19	-0,25	-0,32	-0,32
Y0	-0,17	0,02	<b>-1,00</b>	0,02	1,00	-0,99	0,01	0,02	0,00	-0,01	-0,02	0,00
Z0	0,17	0,10	<b>0,99</b>	0,10	-0,99	1,00	0,06	-0,02	0,00	-0,04	0,00	-0,02
a1	0,00	0,40	0,00	0,40	0,01	0,06	1,00	-0,80	-0,80	-0,96	0,69	0,69
a2	0,00	0,19	-0,02	0,19	0,02	-0,02	-0,80	1,00	1,00	0,85	-0,96	-0,96
a3	0,00	0,19	0,00	0,19	0,00	0,00	-0,80	1,00	1,00	0,85	-0,96	-0,96
b1	0,00	-0,25	0,00	-0,25	-0,01	-0,04	-0,96	0,85	0,85	1,00	-0,82	-0,82
b2	0,00	-0,32	0,02	-0,32	-0,02	0,00	0,69	-0,96	-0,96	-0,82	1,00	1,00
b3	0,00	-0,32	0,00	-0,32	0,00	-0,02	0,69	-0,96	-0,96	-0,82	1,00	1,00

FONTE: O autor (2011)

As análises de exatidão do modelo MR12 foram realizadas empregando os mesmos procedimentos e critérios adotados no caso do modelo MR9. Os resultados obtidos dessas análises são apresentados nas Tabelas 12 e 13 e nas Figuras 56 e 57. Comparando os resultados de exatidões obtidos entre os dois modelos rigorosos implementados e testados nessa pesquisa, verifica-se que as exatidões planialtimétricas são praticamente as mesmas em ambos os modelos.

TABELA 12 – DISCREPÂNCIAS PLANIALTIMÉTRICAS NA MODELAGEM RIGOROSA MR12

id do ponto	Discrepâncias (m)		
	E	N	h
7	-0,931	-0,676	-1,718
15	-1,116	-0,378	0,457
16	-0,258	-0,073	-1,252
17	-0,003	0,406	-1,206
22	-0,326	-0,853	-0,367
24	-0,503	-0,098	-0,573
27	-0,843	-0,522	-2,078
38	-0,117	-0,444	-0,603
54	1,264	1,086	-1,329
59	-0,385	0,052	1,807
60	0,924	-0,407	0,054
62	1,522	0,501	-0,983
63	0,967	0,957	-2,501
71	-0,548	0,268	0,492
75	-1,790	-0,029	-1,388
78	-1,209	-0,139	-0,008
101	0,548	0,597	-0,454
107	1,446	0,276	-1,464
111	0,728	1,000	-3,414
113	0,742	0,311	-2,913
$\mu$	0,006	0,092	-0,972
$\sigma$	0,961	0,559	1,243
RMSE	0,936	0,553	1,553

FONTE: O autor (2011)

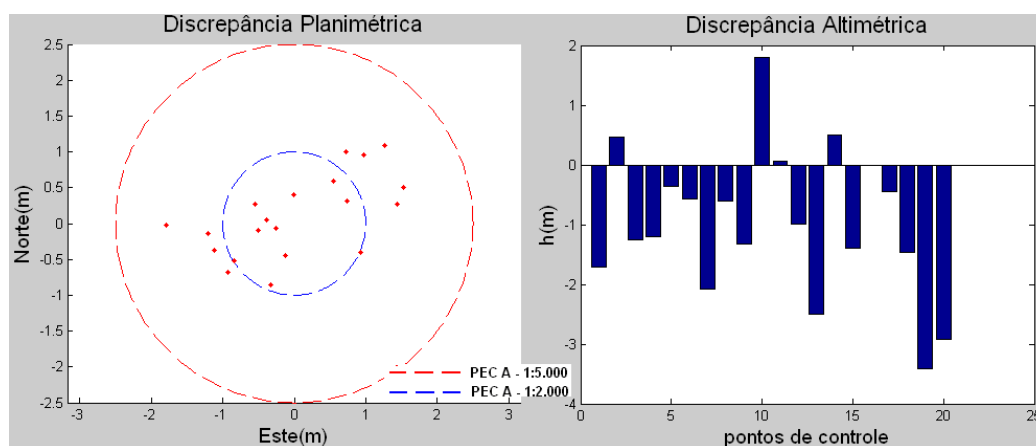


FIGURA 56 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – MR12

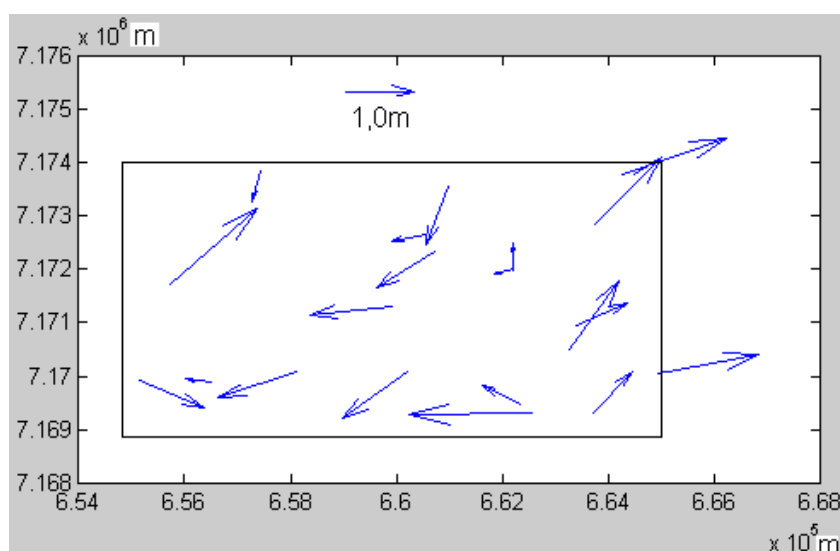
FONTE: O autor (2011)



TABELA 13 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA DE 1:5.000 COM MR12

Teste tendência	Coordenadas		
	E	N	h
$\mu_{\Delta X}$ (m)	0,005	0,0922	-0,972
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	0,961	0,559	1,243
$z_{tab}$	1,6449	1,6449	1,6449
$z_{xcalc}$	0,017	0,273	2,608
<b>Tendência</b>	<b>Não</b>	<b>Não</b>	<b>Sim</b>
<b>Teste Precisão</b>			
$\chi^2_{(19,10\%)}$	27,2	27,2	
$\chi^2$	7,80	2,64	
<b>CLASSE</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	

FONTE: O autor (2011)

FIGURA 57 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA MR12  
FONTE: O autor (2011)

As Figuras 56 e 57 quando comparadas com as Figuras 54 e 55, respectivamente, confirmam para o modelo MR12 as mesmas conclusões apresentadas sobre as precisões planialtimétricas obtidas no modelo rigoroso MR9 já analisado nessa pesquisa. Concluindo, pode-se afirmar que os resultados obtidos na orientação do par estereoscópico geometricamente corrigido, empregando os modelos rigorosos MR9 e MR12, são praticamente iguais e confirmam que o incremento de parâmetros na função polinomial que calcula a posição tridimensional

da plataforma no instante da aquisição da imagem (linha) não contribui em nada com a tentativa de modelar as prováveis distorções que foram detectadas no par estereoscópico.

#### 4.1.3 Modelo de Função Racional - RFM

Conforme descrito na Seção 2.3.2.1, o modelo RFM é o modelo matemático mais apropriado para a orientação de um par estereoscópico geometricamente corrigido quando os coeficientes do mesmo são disponíveis. O grande benefício de utilizar esse modelo matemático na orientação exterior do par estereoscópico está na utilização de uma quantidade mínima de pontos de apoio no refinamento dos coeficientes fornecidos, objetivando uma maior exatidão na determinação de coordenadas tridimensionais pelo processo de intersecção espacial. Entretanto, nesse experimento o número de 25 pontos de apoio será mantido para fins de padronização de resultados obtidos nos modelos empregados nessa pesquisa.

Como já mencionado, a mesma configuração de pontos de apoio, como também de precisões admitidas para as medidas empregas nos ajustamentos dos modelos rigorosos, foram aqui mantidas. Os resíduos nas coordenadas de imagem dos 25 pontos de apoio, provenientes do ajustamento na orientação do par estereoscópico, são apresentados na Tabela 14.

TABELA 14 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – RFM

código do ponto	IMAGEM 01		IMAGEM 02	
	Vx (pixel)	Vy(pixel)	Vx(pixel)	Vy(pixel)
2	-0,06	-0,48	-0,10	-0,03
9	1,05	-1,51	0,76	-1,07
12	0,05	0,05	-0,77	0,55
18	0,47	0,09	1,35	-0,86
23	-0,04	-0,31	-0,06	-0,23
28	1,88	0,70	1,34	1,50
31	0,77	0,55	-0,09	0,71
34	0,16	0,18	-0,21	1,32
35	0,30	0,74	-0,26	1,46
39	-1,28	-0,19	0,29	-0,44
44	0,58	-1,09	1,10	0,20
46	0,10	-0,03	0,69	1,40
51	-0,40	0,69	-0,29	0,52
55	-0,62	-0,03	-0,09	-0,56
56	-0,18	0,76	-0,50	0,43
61	-0,27	1,18	-0,66	0,76
64	0,54	-0,33	0,06	-0,12
65	-0,01	0,21	0,91	-0,60
68	-0,44	-0,26	-1,26	0,09
74	-0,37	-0,62	-1,29	0,20
77	0,01	-1,10	0,30	-0,36
103	-0,78	0,78	-0,34	-1,53
106	-0,02	-0,59	0,18	-1,55
109	-1,05	0,27	0,00	-2,39
116	-0,42	0,35	-1,03	0,61
$\sigma$	0,669	0,664	0,732	0,996

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 14 verifica-se que o desvios-padrão da média dos resíduos nas componentes x e y das imagens 1 e 2, encontram-se dentro do limite de precisão tolerável de um *pixel*. Verifica-se nos desvios padrão dos resíduos nas componentes x e y da imagem 2 valores um pouco acima dos obtidos na imagem 1, mas dentro da precisão admitida para as medidas no ajustamento.

Empregando-se os coeficientes da RFM (RPC) determinados no

ajustamento, realizou-se o processo de intersecção espacial para a determinação de coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação. Tais coordenadas, assim como ocorreu nos experimentos com a modelagem rigorosa, foram comparadas com as coordenadas obtidas em campo, via GPS. Os valores calculados para as discrepâncias planialtimétricas são apresentados na Tabela 15.

TABELA 15 – DISCREPÂNCIAS PLANIALTIMÉTRICAS COM A RFM

id do ponto	Discrepâncias (m)		
	E	N	h
7	-0,225	-0,888	-1,701
15	0,418	-0,133	-1,879
16	-0,610	-0,408	-0,875
17	0,052	0,341	-0,113
22	0,862	-1,239	-0,009
24	0,224	-0,090	0,034
27	0,209	-0,312	-1,066
38	0,011	0,143	-1,853
54	0,986	1,365	-2,006
59	-0,097	0,521	0,924
60	-0,151	-0,255	-1,210
62	0,713	0,341	0,383
63	0,180	0,859	-0,866
71	0,393	0,180	1,179
75	-0,812	-0,039	-0,903
78	0,039	-0,720	0,493
101	0,638	0,595	1,197
107	0,418	-0,755	-1,422
111	0,496	0,573	-2,200
113	0,048	0,111	-1,495
$\mu$	0,190	0,010	-0,669
$\sigma$	0,454	0,633	1,101
RMSE	0,481	0,617	1,265

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se as discrepâncias planimétricas nos 20 pontos de verificação apresentadas na Tabela 15, verifica-se que os valores obtidos para as exatidões planimétricas encontram-se dentro de 0,5 *pixel*. Comparando-se esses valores com os obtidos nos modelos rigorosos, verifica-se que o modelo RFM apresentou maior exatidão planimétrica, parametrizando as deformações que foram observadas no par estereoscópico. Comparando-se os valores de precisão planimétrica obtida no

experimento com os valores determinados na avaliação geométrica das imagens, realizada na seção 3.1 – Tabela 1, verifica-se que com a inclusão de pontos de apoio houve um grande aumento de exatidão planimétrica. A exatidão planimétrica de aproximadamente 5,0 metros, obtida sem pontos de apoio, passou para 0,5 metros com o refinamento do modelo. Esses resultados mostram que as supostas deformações que foram observadas nas imagens estão somente relacionadas com a imprecisão do modelo RFM no processo da correção geométrica da imagem. Entretanto, essas deformações não foram absorvidas pelos modelos rigorosos testados, mesmo com a utilização de um grande número de pontos de apoio no processo. O que também era esperado, tendo vista que os modelos rigorosos foram desenvolvidos para modelar somente as imprecisões dos parâmetros de orientação e posição da plataforma no instante de formação de cada imagem; ou modelos rigorosos aplicam-se somente para orientação de imagens que não foram geometricamente corrigidas.

Analisando-se as discrepâncias altimétricas obtidas com o modelo RFM refinado com pontos de controle verifica-se que o valor da exatidão altimétrica encontra-se dentro do valor esperado para a intersecção espacial. Verifica-se também que a exatidão altimétrica obtida no modelo RFM possui um pequeno incremento de qualidade. Entretanto, a pequena tendenciosidade da determinação altimétrica, observada nos experimentos com os modelos rigorosos, não sofreu aqui alterações significativas. Esses resultados permitem concluir que os valores de tendenciosidade na determinação altimétrica podem estar relacionada somente com a imprecisão altimétrica do processo de intersecção espacial ou deformações na imagem não que não foram modeladas, mesmo com as informações dos pontos de apoio.

As exatidões planimétricas obtidas com o modelo RFM foram comparadas com exatidões requeridas para o enquadramento de exatidão de produto cartográfico da Classe A nas escalas 1:2.000 e 1:5.000. Essa comparação, segundo

PEC, deve considerar que 90% dos pontos de verificação devem possuir valores de discrepância dentro do valor de PEC tolerável de 1,0 e 2,5 metros nas escalas 1:2000 e 1:5000, respectivamente.

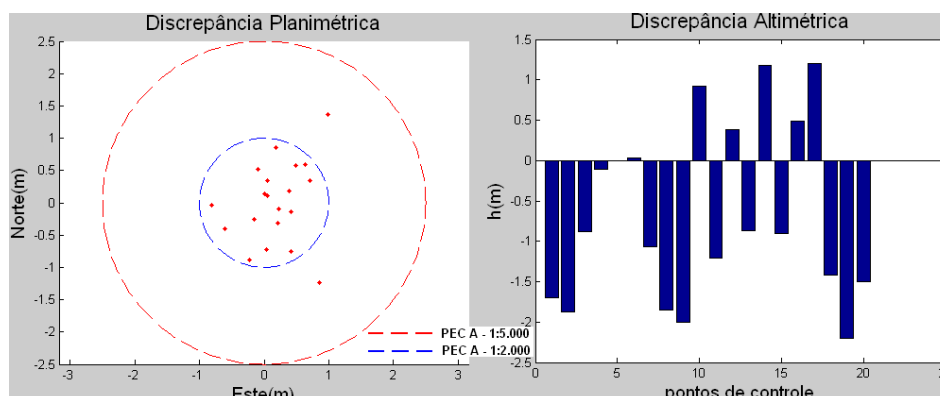


FIGURA 58 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – RFM  
FONTE: O autor (2011)

Analisando a Figura 58, verifica-se as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação encontra-se dentro do PEC tolerável para 1/5000 ou a exatidão planimétrica obtida encontra-se dentro de valor de uma exatidão do padrão cartográfico para a escala de 1/5000, podendo até ser enquadrado para a exatidão do PEC na classe A – 1/2000, pois 90% dos pontos encontram-se dentro do círculo na cor azul. Considerado para o PEC altimétrico, os intervalos entre curvas de nível os valores de 1,0 metro e 5,0 metros, como sendo valores normalmente empregados para a representação do relevo nas escalas de 1/2000 e 1/5000 respectivamente, de acordo como visto em 4.1.1, verifica que a exatidão altimétrica obtida no modelo RFM encontra-se dentro padrão admissível para a escala de 1/5000. A exatidão altimétrica apresentou valor um pouco melhor aos valores encontrados nos experimentos com a modelagem MR9 e MR12. Conforme já mencionado, verifica-se também na Figura 58 a existência de tendência nos resultados encontrados para a componente altimétrica. No entanto, testes estatísticos tornam-se necessários para comprovar as exatidões planimétrica e altimétrica encontradas e também comprovar a afirmação da pequena tendenciosidade para a componente altimétrica.

O teste de normalidade foi inicialmente realizado com o objetivo de verificar

a existência de tendência na determinação das componentes planialtimétricas, enquanto que o teste para avaliar a exatidão das coordenadas 3D foi realizado com base na distribuição do Qui-Quadrado, a um nível de significância de 10%.

TABELA 16 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA DE 1:5.000 COM A RFM

Teste tendência	Coordenadas		
	E	N	h
$\mu_{\Delta X}$ (m)	0,190	0,010	-0,669
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	0,454	0,633	1,101
$Z_{tab}$	1,6449	1,6449	1,6449
$Z_{xcalc}$	0,565	0,028	1,79
<b>Tendência</b>	<b>Não</b>	<b>Não</b>	<b>Sim</b>
<b>Teste Precisão</b>			
$\chi^2_{(19,10\%)}$	27,2	27,2	
$\chi^2$	1,738	3,385	
<b>CLASSE</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	

FONTE: O autor (2011)

Verifica-se na Tabela 16 que o teste de tendência realizado para as coordenadas tridimensionais comprova a existência de tendência somente na componente altimétrica, para um nível de significância de 10%. Entretanto, nesse teste, o valor de “ $Z_{calc}$ ” para a componente altimétrica encontra-se bastante próximo do intervalo de aceitação o que não acontece para os experimentos realizados com os modelos rigorosos. Desta forma, pode-se inferir que a exatidão altimétrica obtida com o modelo RFM é melhor do que a encontrada nos modelos rigorosos, como já verificado nas análises da Figura 58 e Tabela 15. Sobre o teste estatístico de precisão planimétrica obtida com base na estatística do Qui-Quadrado, verifica-se que o valor do Qui-Quadrado amostral no nível de significância de 10% encontra-se dentro da tolerância admissível, ou seja, o teste realizado para os 20 pontos de verificação permite enquadrar a exatidão planimétrica do PEC na escala de 1:5.000 – classe A.

Os vetores de representação das discrepâncias planimétricas apresentados na Figura 59, confirmam que não houve ocorrência de tendenciosidade em

planimetria no experimento realizado.

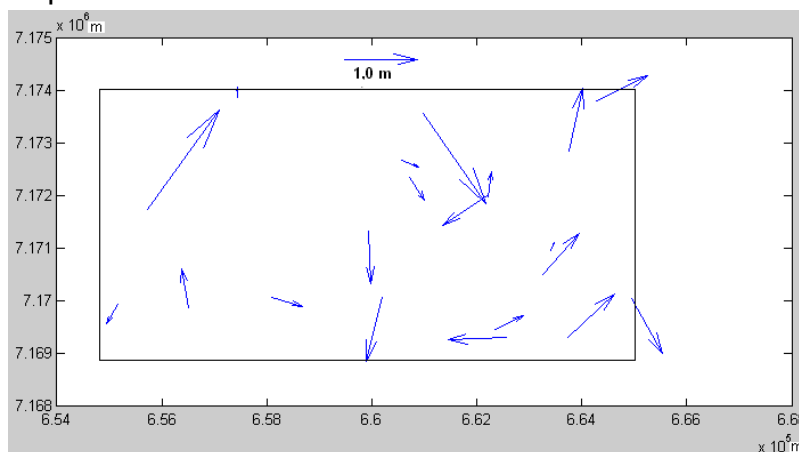


FIGURA 59 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA RFM  
FONTE: O autor (2011)

#### 4.1.4 Transformação Linear Direta - DLT

Apesar dos excelentes resultados obtidos com o modelo RFM a transformação matemática DLT foi utilizada nessa pesquisa, principalmente para verificar o desempenho de modelos aproximados comumente empregados nessa aplicação quando não se tem disponível os coeficientes da RFM. Sabe-se que a DLT é um modelo tradicional que aproxima-se das equações de colinearidade, muito utilizada em aplicações da Fotogrametria e do Sensoriamento Remoto que requerem a orientação aproximada de uma imagem ou par estereoscópico. As principais vantagens do uso dessa função na orientação do par estão relacionadas com a inexigência de informações sobre as características internas do sensor, relacionamento de forma direta com coordenadas de pontos no sistema de imagem (dado em pixel) com as coordenadas de pontos no terreno, somente seis pontos de apoio são suficientes para determinação dos coeficientes da função utilizando-se de um ajustamento por mínimos quadrados e ainda, pode ser considerada como uma grande vantagem a facilidade de implementação computacional.

O experimento com a DLT foi realizado seguindo os mesmos critérios adotados nos experimentos anteriores, ou seja, realizou-se o ajustamento da função, análises de precisões obtidas e análises de exatidões do modelo para a



determinação de coordenadas tridimensionais via intersecção espacial.

Para realização do ajustamento foi empregada a mesma configuração de 25 pontos de apoio e admitido o valor de um *pixel* para a precisão das observações, enquanto que as coordenadas de terreno, utilizadas como pontos de apoio, foram admitidas como sendo isentas de erros. O método de ajustamento por mínimos quadrados utilizado foi o paramétrico não linear. Os resíduos provenientes do ajustamento são apresentados na Tabela 17.

TABELA 17 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – DLT

código do ponto	IMAGEM 01		IMAGEM 02	
	Vx (pixel)	Vy(pixel)	Vx(pixel)	Vy(pixel)
2	0,28	0,099	-0,226	0,311
9	1,165	1,067	0,815	-0,384
12	0,29	0,319	-0,211	0,183
18	0,26	0,216	0,230	-0,155
23	0,149	0,067	0,047	-0,280
28	0,48	0,261	-0,147	0,359
31	0,218	0,093	-0,681	0,228
34	-0,396	-0,472	-0,441	0,531
35	0,167	0,030	-0,311	0,563
39	-0,845	-0,957	0,237	-0,120
44	0,138	0,058	0,776	-1,030
46	0,11	0,098	0,639	1,031
51	0,228	0,244	-0,036	-0,944
55	-0,106	0,078	0,323	0,037
56	-0,858	-0,683	-0,390	-0,588
61	-0,45	0,037	-0,177	-0,248
64	0,009	0,107	-0,120	0,811
65	0,298	0,375	1,168	0,214
68	-0,166	-0,366	-0,844	0,631
74	-0,139	-0,296	-1,007	0,736
77	0,256	0,074	0,795	-0,067
103	-0,276	-0,382	-0,163	-0,377
106	0,186	0,323	0,211	-0,054
109	-0,616	-0,427	0,057	-1,270
116	-0,384	0,036	-0,543	-0,120
$\sigma$	0,441	0,402	0,542	0,578

FONTE: O autor (2011)

Levando em consideração as precisões pré-estabelecidas para as observações (um pixel) e os resultados para o desvio-padrão da média dos resíduos, apresentados na Tabela 17, observa-se nas componentes x e y das imagens que os valores obtidos estão dentro do limite de tolerância, demonstrando que o modelo matemático foi capaz de modelar as distorções presentes nas imagens. Apesar do caráter aproximado do modelo matemático DLT, os resultados de precisões obtidas no ajustamento comprovam a sua eficiência na orientação do par estereoscópico em questão, pois de todos os modelos até aqui testados, foi o que alcançou a melhor precisão do ajustamento como pode ser visto nas dimensões dos resíduos obtidos e seus desvios-padrão. Os resultados estatísticos obtidos na análise dos resíduos como também do teste de igualdade de variâncias *a priori* com a *posteriori*, apresentado na Tabela 18, confirmam a conclusão de melhor precisão nos ajustamentos realizados com os modelos até aqui testados.

TABELA 18 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DO MODELO DLT

$\hat{\sigma}_0^2$	0,974			
$\chi^2_{v,\frac{\alpha}{2}}$	125,41		nº Iterações	
$\chi^2$	149,03		6	
$\chi^2_{v,1-\frac{\alpha}{2}}$	182,86		gl=153	
	<b>IMAGEM 01</b>		<b>IMAGEM 01</b>	
POE	<b>Parâm. ajustados</b>	<b>Precisões</b>	<b>Parâm. ajustados</b>	<b>Precisões</b>
<b>L1</b>	0,8816680	0,0935299	0,8537019	0,0843660
<b>L2</b>	-0,0001909	0,0000796	-0,0002401	0,0000712
<b>L3</b>	0,1232655	0,0113732	0,0184228	0,0061875
<b>L4</b>	-576074,51	61726,46	-557312,76	55648,63
<b>L5</b>	0,0000186	0,0000294	0,0001883	0,0000324
<b>L6</b>	-0,8817804	0,0935091	-0,8538129	0,0843466
<b>L7</b>	-0,0744770	0,0106260	0,3994317	0,0386444
<b>L8</b>	6325927,48	670841,573	6124741,58	605054,89
<b>L9</b>	-1,57E-08	8,37E-09	1,19E-09	7,92E-09
<b>L10</b>	-1,50E-08	1,33E-08	-2,05E-08	1,19E-08
<b>L11</b>	-4,59E-08	1,69E-06	-3,30E-07	1,64E-06

FONTE: O autor (2011)

Apesar de ser possível calcular os parâmetros físicos do sensor a partir dos parâmetros da DLT numa imagem de quadro, no experimento realizado nessa pesquisa, os parâmetros da DLT não possuem nenhum relacionamento físico, pois as imagens do par foram geometricamente corrigidas e ainda, as imagens originais são geradas através de uma varredura linear. Mesmo assim é possível analisar a correlação entre os parâmetros e as suas precisões, a fim de obter conclusões sobre as precisões do ajustamento realizado.

Nas Tabelas 19 e 20 são apresentadas as matrizes de correlação entre parâmetros para a imagem 1 e 2, respectivamente e na Tabela 18 os parâmetros e suas precisões. Analisando-se os resultados apresentados nas Tabela 19 e 20 é possível verificar a existência de correlação total entre vários parâmetros do modelo matemático. Entretanto, devido ao não significado físico dos parâmetros, torna-se muito difícil a determinação de causas físicas para essas correlações. Por outro lado, fica evidente que para essa aplicação o modelo DLT está super-parametrizado. Essa particularidade pode também ser vista quando as precisões dos parâmetros são analisadas. Verifica-se que existem aproximadamente três parâmetros sem significado matemático, pois as precisões desses, determinadas na matriz variância e covariância, têm valores maiores ou iguais aos valores determinados pelo ajustamento.

TABELA 19 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 1- DLT

	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>	<b>L7</b>	<b>L8</b>	<b>L9</b>	<b>L10</b>	<b>L11</b>
<b>L1</b>	1	0,83	0,84	-1,00	-0,04	-1,00	-0,86	1,00	-0,21	1,00	-0,38
<b>L2</b>	0,83	1	0,60	-0,83	-0,09	-0,83	-0,76	0,83	-0,23	0,83	-0,41
<b>L3</b>	0,84	0,60	1	-0,84	0,05	-0,84	-0,59	0,84	-0,15	0,83	0,03
<b>L4</b>	<b>-1,00</b>	-0,83	-0,84	1	0,04	1,00	0,86	-1,00	0,21	-1,00	0,38
<b>L5</b>	-0,04	-0,09	0,05	0,04	1	0,04	0,03	-0,04	0,57	-0,07	-0,01
<b>L6</b>	<b>-1,00</b>	-0,83	-0,84	<b>1,00</b>	0,04	1,00	0,86	-1,00	0,21	-1,00	0,38
<b>L7</b>	-0,86	-0,76	-0,59	0,86	0,03	0,86	1	-0,86	0,15	-0,87	0,62
<b>L8</b>	<b>1,00</b>	0,83	0,84	<b>-1,00</b>	-0,04	<b>-1,00</b>	-0,86	1	-0,21	1,00	-0,38
<b>L9</b>	-0,21	-0,23	-0,15	0,21	0,57	0,21	0,15	-0,21	1	-0,26	-0,21
<b>L10</b>	<b>1,00</b>	0,83	0,83	<b>-1,00</b>	-0,07	<b>-1,00</b>	-0,87	<b>1,00</b>	-0,26	1	-0,37
<b>L11</b>	-0,38	-0,41	0,03	0,38	-0,01	0,38	0,62	-0,38	-0,21	-0,37	1

FONTE: O autor (2011)

TABELA 20 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 2- DLT

	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>	<b>L7</b>	<b>L8</b>	<b>L9</b>	<b>L10</b>	<b>L11</b>
<b>L1</b>	1	0,79	-0,24	-1,00	0,48	-1,00	0,99	1,00	0,00	1,00	-0,38
<b>L2</b>	0,79	1	-0,37	-0,80	0,33	-0,79	0,77	0,79	-0,05	0,80	-0,41
<b>L3</b>	-0,24	-0,37	1	0,24	0,01	0,24	-0,17	-0,24	0,04	-0,25	0,71
<b>L4</b>	<b>-1,00</b>	-0,80	0,24	1	-0,48	1,00	-0,99	-1,00	0,00	-1,00	0,38
<b>L5</b>	0,48	0,33	0,01	-0,48	1	-0,48	0,48	0,48	0,50	0,45	-0,20
<b>L6</b>	<b>-1,00</b>	-0,79	0,24	<b>1,00</b>	-0,48	1	-0,99	-1,00	0,00	-1,00	0,38
<b>L7</b>	0,99	0,77	-0,17	-0,99	0,48	<b>-0,99</b>	1	0,99	-0,01	0,99	-0,30
<b>L8</b>	<b>1,00</b>	0,79	-0,24	<b>-1,00</b>	0,48	<b>-1,00</b>	<b>0,99</b>	1	0,00	1,00	-0,38
<b>L9</b>	0,00	-0,05	0,04	0,00	0,50	0,00	-0,01	0,00	1	-0,06	-0,30
<b>L10</b>	<b>1,00</b>	0,80	-0,25	<b>-1,00</b>	0,45	<b>-1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	-0,06	1	-0,37
<b>L11</b>	-0,38	-0,41	0,71	0,38	-0,20	0,38	-0,30	-0,38	-0,30	-0,37	1

FONTE: O autor (2011)

Empregando o modelo matemático da DLT ajustado na orientação do par estereoscópico, realizou-se a intersecção espacial para a determinação de coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação. Os valores das discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais calculadas e as coordenadas obtidas em campo via GPS são apresentados na Tabela 21.

TABELA 21 –DISCREPÂNCIAS ENTRE AS COORDENADAS UTILIZANDO-SE A DLT

<b>id do ponto</b>	<b>Discrepâncias (m)</b>		
	<b>E</b>	<b>N</b>	<b>h</b>
7	-0,313	-0,644	-1,305
15	-0,511	-0,384	0,792
16	-0,308	-0,130	-0,917
17	-0,062	0,346	-0,873
22	0,744	-0,752	-0,014
24	0,370	-0,048	0,092
27	-0,178	-0,515	-1,461
38	0,294	-0,245	-0,478
54	0,849	0,967	-1,444
59	-0,272	-0,024	1,732
60	-0,628	-0,678	-1,073
62	0,909	0,340	-1,970
63	0,103	0,765	-2,987
71	-0,008	0,383	0,747
75	-1,290	0,122	-1,213
78	-0,333	-0,122	0,814
101	0,389	0,720	-0,657
107	0,103	0,249	-1,793
111	0,418	0,985	-3,146
113	0,221	0,274	-2,635
<b>μ</b>	0,025	0,080	-0,889
<b>σ</b>	0,535	0,531	1,312
<b>RMSE</b>	0,535	0,537	1,598

Verifica-se na Tabela 21 que os valores do desvio padrão da média para as componentes planimétricas obtidos na análise das discrepâncias, evidenciam uma distribuição normal, sem tendência e com valores de exatidão compatíveis com as precisões obtidas no ajustamento realizado. Nesse sentido é possível afirmar que para o experimento realizado o modelo matemático da DLT conseguiu parametrizar as deformações existentes no par estereoscópico devido ao processo de correção geométrica, apesar da existência de correlações entre parâmetros. O valor obtido para a precisão altimétrica nesse experimento, assim como nos experimentos anteriores (MR9, MR12 e RFM), encontra-se dentro da precisão esperada, dada pela relação base-altura, como pode ser verificado na Tabela 21. A Figura 60 mostra graficamente os resultados obtidos para as discrepâncias planimétricas e altimétricas nesse experimento.

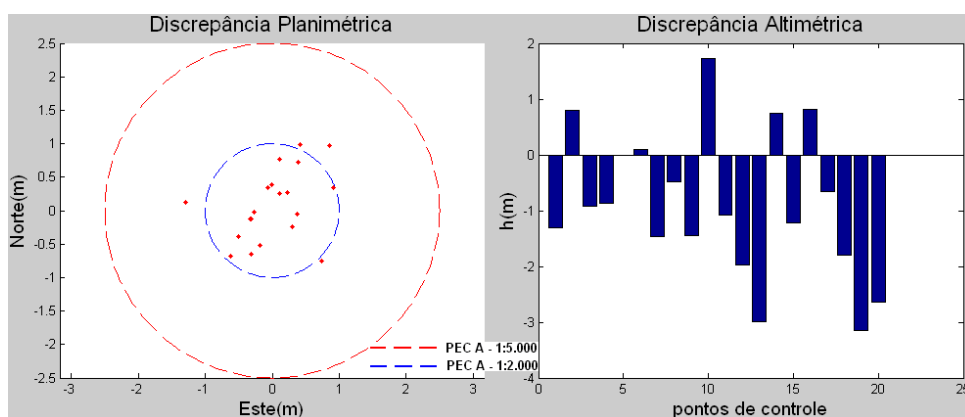


FIGURA 60 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA – DLT  
FONTE: O autor (2011)

Verifica-se na Figura 60 que as exatidões planimétrica e altimétrica da determinação tridimensional encontram-se dentro do limite de tolerância compatível com o PEC na escala de 1:5.000 - classe A. Por outro lado, diferente do que foi obtido para a aplicação do modelo RFM, verifica-se aqui que a exatidão planimétrica obtida não se enquadra no PEC para a escala de 1/2000 – classe A.

As conclusões de enquadramento das exatidões segundo o PEC foram também realizadas através de testes estatísticos, conforme pode-se observar na Tabela 22. Igualmente como foi realizado nos experimentos anteriores, inicialmente

é realizado um teste para verificar a existência de tendência nas coordenadas tridimensionais, baseado na distribuição normal para um nível de significância de 10% e, em seguida, uma análise de precisão por meio do teste estatístico do Qui-Quadrado. Como já mencionado, o teste de precisão foi realizado somente nas discrepâncias que possuem distribuição normal.

TABELA 22 – TESTE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA UMA ESCALA 1:5.000 COM DLT

Teste tendência	Coordenadas		
	E	N	h
$\mu_{\Delta X}$ (m)	0,025	0,080	-0,889
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	0,535	0,531	1,312
$z_{tab}$	1,6449	1,6449	1,6449
$z_{calc}$	0,074	0,24	2,38
<b>Tendência</b>	<b>Não</b>	<b>Não</b>	<b>Sim</b>
<b>Teste Precisão</b>			
$\chi^2_{(19,10\%)}$	27,2	27,2	
$\chi^2$	2,418	2,382	
<b>CLASSE</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	

FONTE: O autor (2011)

Verifica-se na Tabela 22 que a comparação entre o “z” amostral das componentes tridimensionais com o valor teórico ( $z_{tab}$ ) comprova a inexistência de tendência nas componentes planimétricas. Entretanto, para a componente altimétrica, a pequena tendência que foi verificada nos outros experimentos realizados se mantém, como comprovado no teste estatístico realizado e Figura 60. A causa dessa tendenciosidade, como já mencionado, pode estar relacionada com alguma deformação existente nas imagens que não foi parametrizada pelos modelos até aqui testados ou devida a própria imprecisão da intersecção espacial na determinação da coordenada altimétrica. Com relação as exatidões resultantes com o modelo DLT e suas comprovações via testes estatísticos, tem-se com a aplicação do Qui-Quadrado com o nível de significância de 10%, o enquadramento da exatidão planimétricas no padrão de exatidão do PEC para a escala de 1/5000 – classe A, como pode ser vistos na Tabela 22.

De forma muito similar com as precisões obtidas no experimento realizado com o modelo RFM, os vetores de representação das discrepâncias planimétricas foram gerados e apresentados na Figura 61 e igualmente confirmam que não existe tendenciosidade em planimetria no experimento realizado.

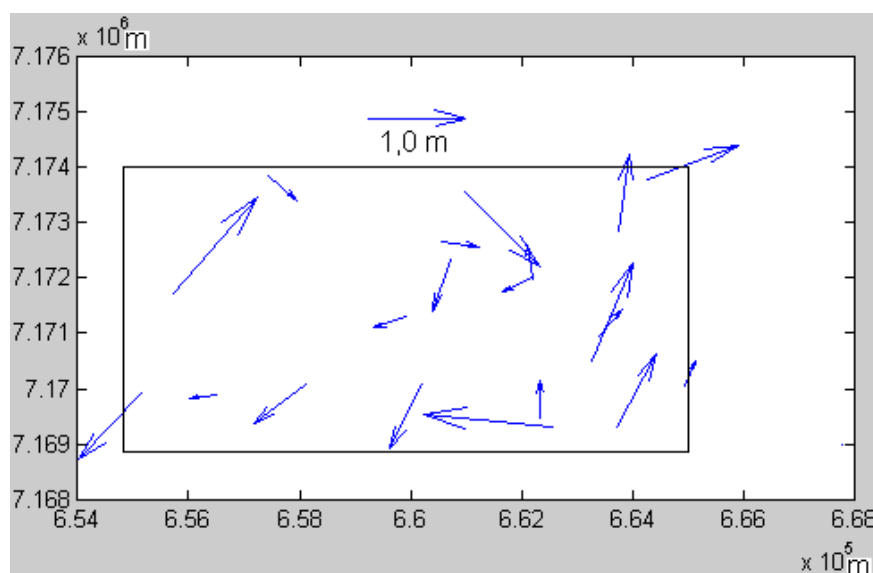


FIGURA 61 – VETORES DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA DLT  
FONTE: O autor (2011)

Como conclusão a respeito da utilização do modelo DLT na aplicação em questão, pode-se afirmar que o modelo teve um bom desempenho. Entretanto a sua utilização em procedimentos práticos dessa natureza pode ser questionada em função da forte correlação existente entre parâmetros o que evidencia a ocorrência de modelo super-parametrizado. Essa condição pode trazer instabilidade na resolução do sistema de equações como também a grande possibilidade de absorção de erros grosseiros, falseando as precisões obtidas no ajustamento e acarretando inexactidões no processo.

#### 4.1.5 APM

Uma outra possibilidade de aplicação de modelo aproximado para a orientação do par estereoscópico quando não se tem os coeficientes do modelo

RFM é o emprego da transformação Afim de Projeção Paralela – APM. As correlações totais entre parâmetros, observadas na aplicação da transformação DLT, evidenciado a utilização de um modelo super-parametrizado, motivou a realização do experimento com o modelo APM. De maneira semelhante a transformação DLT, a utilização do modelo matemático APM não necessita de nenhuma informação a respeito dos parâmetros de orientação interior do sistema sensor e o relacionamento entre as coordenadas de pontos na imagem com o correspondente no terreno pode também ser realizado de forma direta. Além disso, entre os modelos até aqui avaliados, o APM pode ser considerado como sendo o modelo matemático que possui as maiores facilidades, tanto na implementação computacional, como também na resolução do sistema de equações, tendo em vista a solução linear do sistema de equações envolvido nessa aplicação.

As mesmas configurações que foram definidas para a realização do ajustamento dos modelos avaliados são adotadas com a modelagem aproximada APM. As análises de precisão e exatidão do modelo, seguiram os mesmos procedimentos e critérios adotados com os modelos já avaliados. Os resíduos obtidos do ajustamento por mínimos quadrados realizado, são apresentados na Tabela 23.

TABELA 23 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA IMAGEM 1 E 2 – APM

código do ponto	IMAGEM 01		IMAGEM 02	
	Vx (pixel)	Vy(pixel)	Vx(pixel)	Vy(pixel)
2	0,28	-0,34	-0,257	0,285
9	1,165	-0,327	0,766	-0,324
12	0,29	-0,53	-0,246	0,174
18	0,26	-0,311	0,212	-0,185
23	0,149	-0,299	0,046	-0,271
28	0,48	-0,37	-0,172	0,395
31	0,218	0,764	-0,578	0,257
34	-0,396	0,552	-0,35	0,51
35	0,167	0,059	-0,176	0,633
39	-0,845	-0,023	0,315	-0,188
44	0,138	-1,013	0,852	-1,103
46	0,11	-0,003	0,598	0,961
51	0,228	0,064	0,156	-0,864
55	-0,106	-0,318	0,299	-0,017



56	-0,858	0,735	-0,523	-0,65
61	-0,45	0,96	-0,421	-0,163
64	0,009	-0,332	-0,256	0,852
65	0,298	0,224	1,115	0,151
68	-0,166	-0,205	-0,825	0,675
74	-0,139	-0,44	-0,875	0,785
77	0,256	-0,681	0,746	-0,136
103	-0,276	0,652	-0,022	-0,328
106	0,186	0,22	0,437	-0,063
109	-0,616	0,619	-0,019	-1,331
116	-0,384	0,343	-0,823	-0,055
<b><math>\sigma</math></b>	0,441	0,506	0,548	0,588

FONTE: O autor (2011)

Na Tabela 23, observa-se que os desvios padrão calculados para os resíduos nas componentes “x” e “y”, tanto para a imagem 1 quanto para a imagem 2, possuem precisões com valores próximos de 0,5 *pixel*. Esses resultados mostram que o modelo matemático APM conseguiu parametrizar as deformações geométricas existentes nas imagens. Verifica-se que apesar do menor número de parâmetros no modelo APM, os valores de resíduos são praticamente iguais aos que foram obtidos com a DLT, o que confirma a conclusão posta que o modelo DLT pode ser substituído por um modelo com menor número de parâmetros para a realização do experimento em questão. As precisões obtidas para os resíduos mostram que o ajustamento foi realizado dentro das tolerâncias de precisões admitidas para as medidas. Essa conclusão é confirmada no teste do Qui-Quadrado realizado para verificação da igualdade de variâncias a priori com a posteriori, apresentado na Tabela 24.

Como no caso da transformação DLT, os coeficientes do modelo matemático APM não representam parâmetros físicos de orientação exterior, são aqui, simplesmente, tratados como sendo os coeficientes de um modelo matemático que estabelece relação entre sistemas de coordenadas envolvidos no processo de orientação. Para fins de verificação de precisões obtidas no ajustamento, os parâmetros com suas precisões são apresentadas na Tabela 24, assim como as correlações matemáticas entre parâmetros são apresentadas nas Tabelas 25 e 26.

TABELA 24 – RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DO MODELO APM.

$\hat{\sigma}_0^2$	0,993			
$\chi^2_{v,\frac{\alpha}{2}}$	130,85		<b>nº Iterações</b>	
$\chi^2$	157,89		6	
$\chi^2_{v,1-\frac{\alpha}{2}}$	189,42		gl=159	
	<b>IMAGEM 01</b>		<b>IMAGEM 01</b>	
Parâmetros	<b>Parâm. ajustados</b>	<b>Precisões</b>	<b>Parâm. Ajustados</b>	<b>Precisões</b>
<b>a1</b>	1,0000477	0,0000269	0,9999838	0,0000269
<b>a2</b>	-0,0001305	0,0000496	-0,0001511	0,0000496
<b>a3</b>	0,1420789	0,0047092	0,0199707	0,0047092
<b>a4</b>	-654042,35	356,204	-653740,245	356,204
<b>a5</b>	0,0000606	0,0000269	0,0002173	0,0000269
<b>a6</b>	-1,0000446	0,0000496	-1,0000520	0,0000496
<b>a7</b>	-0,0822732	0,0047092	0,4689158	0,0047092
<b>a8</b>	7174331,72	356,203987	7173774,33	356,204

FONTE: O autor (2011)

Verifica-se nas Tabelas 25 e 26 que apesar do modelo APM possuir menor número de parâmetros do que a DLT ainda existem fortes correlações matemática entre parâmetros. De forma similar ao modelo da DLT não se tem como justificar a ocorrência dessas correlações, pois como já mencionado os parâmetros determinados não possuem significado físico. Entretanto, aqui na APM, analisando-se as precisões obtidas para os parâmetros na Tabela 24, verifica a inexistência de parâmetros não significativos, mostrando que o modelo APM não está super-parametrizado, apesar da correlação encontrada em dois pares de parâmetros envolvidos. Os parâmetros de translação a4 e a8 encontram-se correlacionados com os parâmetros a2 e a6 que podem estar relacionados com rotações ou escalas na componente Y de terreno.

TABELA 25 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 1- APM

	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>a4</b>	<b>a5</b>	<b>a6</b>	<b>a7</b>	<b>a8</b>
<b>a1</b>	1	0,05	-0,15	-0,10	0	0	0	0
<b>a2</b>	0,05	1	-0,19	-1,00	0	0	0	0
<b>a3</b>	-0,15	-0,19	1	0,19	0	0	0	0
<b>a4</b>	-0,10	<b>-1,00</b>	0,19	1	0	0	0	0
<b>a5</b>	0	0	0	0	1	0,05	-0,15	-0,10
<b>a6</b>	0	0	0	0	0,05	1	-0,19	-1,00
<b>a7</b>	0	0	0	0	-0,15	-0,19	1	0,19
<b>a8</b>	0	0	0	0	-0,10	<b>-1,00</b>	0,19	1

FONTE: O autor (2011)

TABELA 26 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 2- APM

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8
a1	1	0,05	-0,15	-0,10	0	0	0	0
a2	0,05	1	-0,19	-1,00	0	0	0	0
a3	-0,15	-0,19	1	0,19	0	0	0	0
a4	-0,10	<b>-1,00</b>	0,19	1	0	0	0	0
a5	0	0	0	0	1	0,05	-0,15	-0,10
a6	0	0	0	0	0,05	1	-0,19	-1,00
a7	0	0	0	0	-0,15	-0,19	1	0,19
a8	0	0	0	0	-0,10	<b>-1,00</b>	0,19	1

FONTE: O autor (2011)

Empregando-se os parâmetros do modelo APM, juntamente com as coordenadas dos pontos homólogos de verificação, foram determinadas as coordenadas tridimensionais desses pontos pelo processo de intersecção espacial. A Tabela 27 apresenta os resultados encontrados das discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais determinadas pelo processo de intersecção espacial e suas correspondes de campo, obtidas via levantamento GPS.

TABELA 27 – DISCREPÂNCIA ENTRE AS COORDENADAS UTILIZANDO-SE A APM.

id do ponto	Discrepâncias (m)		
	E	N	h
7	-0,388	-0,665	-1,341
15	-0,500	-0,376	0,836
16	-0,326	-0,159	-0,863
17	-0,081	0,317	-0,820
22	0,697	-0,745	-0,062
24	0,294	-0,105	0,056
27	-0,247	-0,569	-1,484
38	0,176	-0,288	-0,722
54	0,918	0,914	-1,367
59	-0,124	0,034	1,878
60	-0,363	-0,528	-0,678
62	1,175	0,548	-1,688
63	0,252	0,841	-2,819
71	-0,134	0,328	0,539
75	-1,419	0,076	-1,419
78	-0,420	-0,208	0,766
101	0,287	0,662	-0,853
107	0,069	0,147	-1,911
111	0,345	0,895	-3,229

113	0,177	0,194	-2,637
$\mu$	0,019	0,066	-0,891
$\sigma$	0,564	0,522	1,299
<b>RMSE</b>	0,564	0,526	1,588

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados da análise de discrepâncias apresentados na Tabela 27, verifica-se que as exatidões planialtimétricas são similares aos valores que foram obtidos com o a transformação DLT. Os valores de exatidões obtidos na análise de discrepâncias nos pontos de verificação refletem os valores de precisões que foram obtidos na análise de resíduos provenientes do ajustamento. Esses resultados comprovam a realização de um ajustamento dentro de precisões e exatidões esperadas para a realização do experimento.

Igualmente como obtido para a DLT, na Figura 62 verifica-se que a exatidão planimétrica obtida não possibilita enquadrá-la para a mesma exatidão do PEC de um produto cartográfico classe A na escala de 1/2000, mas sim para uma classe A na escala de 1/5000. Com relação a exatidão altimétrica obtida com o modelo APM, também é verificado o comportamento similar ao encontrado com a DLT. A mesma tendenciosidade foi verificada, como pode ser vista na Figura 62 e mostra que o modelo APM também não parametrizou possível deformação existente nas imagens ou a mesma é inerente a imprecisão existente no processo de intersecção espacial empregada na determinação das coordenadas tridimensionais. Entretanto, a exatidão altimétrica, mesmo com a existência dessa pequena tendência, pode ser enquadrada no PEC altimétrico na escala de 1/5000 com curvas de nível de 5,0 metros de equidistância – classe A.

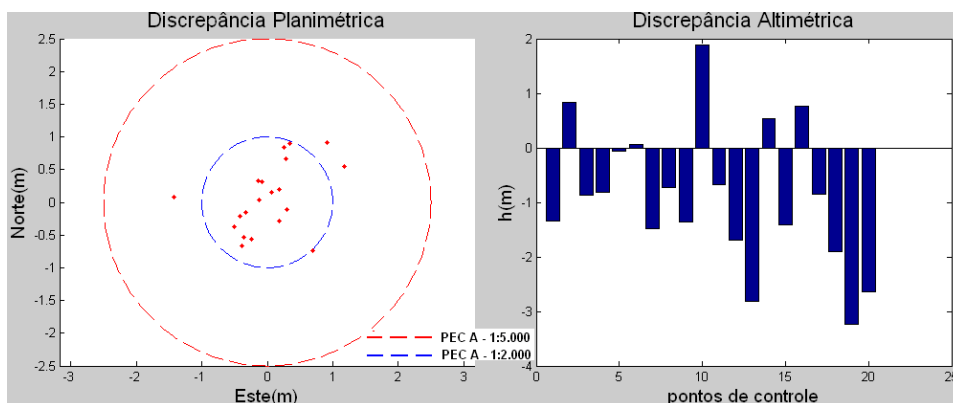


FIGURA 62 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA PARA APM DOS 20 PONTOS DE VERIFICAÇÃO  
 FONTE: O autor (2011)

Os enquadramentos das exatidões obtidas segundo o PEC foram também realizadas através de testes estatísticos, conforme pode-se observar na Tabela 28. Igualmente como foi realizado nos experimentos anteriores, inicialmente é realizado um teste para verificar a existência de tendência nas coordenadas tridimensionais, baseado na distribuição normal para um nível de significância de 10% e, em seguida, uma análise de precisão por meio do teste estatístico do Qui-Quadrado..

TABELA 28 – TESTE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA UMA ESCALA 1:5.000 COM APM

Teste	Coordenadas		
	E	N	h
$\mu_{\Delta X}$ (m)	0,019	0,066	-0,891
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	0,564	0,522	1,299
$z_{tab}$	1,6449	1,6449	1,6449
$z_{xcalc}$	0,058	0,195	2,39
<b>Tendência</b>	<b>Não</b>	<b>Não</b>	<b>Sim</b>
<b>Teste Precisão</b>			
$\chi^2_{(19,10\%)}$	27,2	27,2	
$\chi^2$	2,690	2,300	
<b>CLASSE</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	

FONTE: O autor (2011)

Observa-se na Tabela 28 que os valores “z” amostral das componentes tridimensionais (E, N e h) são inferiores ao valor teórico ( $z_{tab}$ ). A comparação entre esses valores comprovam a existência de tendência apenas na componente

altimétrica (h). O valor do qui-quadrado amostral para as componentes tridimensionais, quando comparado com o valor teórico, para um nível de significância de 10%, possibilita enquadrar as exatidão planimétrica como sendo equivalente as exatidões planimétricas do PEC para o produto cartográfico na classe A na escala de 1/5000.

De forma muito similar com as precisões obtidas no experimento realizado com o modelo DLT, os vetores de representação das discrepâncias planimétricas foram gerados e apresentados na Figura 63 e igualmente confirmam que não existe tendenciosidade em planimetria no experimento realizado.

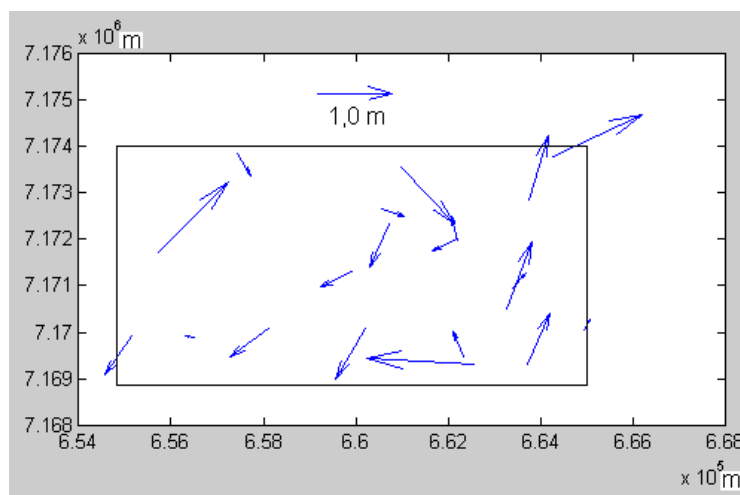


FIGURA 63 – VETOR DE DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA PARA APM  
FONTE: O autor (2011)

#### 4.1.6 Comparação de resultados obtidos com os modelos MR9, MR12, RFM, DLT e APM

Realiza-se aqui a comparação dos desempenhos obtidos de cada modelo testado nos experimentos realizados nessa pesquisa. Tomou-se como base para a realização dessa verificação os resultados de exatidões planialtimétricas obtidas com as aplicações dos modelos na determinação das coordenadas planialtimétricas via intersecção espacial. Na Tabela 29 e Figura 64 são apresentas as exatidões planialtimétricas obtidas.

- Pelos resultados de exatidões obtidas pode apresentar as seguintes considerações:
- De forma geral, qualquer um dos cinco modelos testados poderá ser empregado para a obtenção de coordenadas planialtimétricas via intersecção espacial com um par estereoscópico IKONOS II com exatidão que se enquadra no PEC na escala de 1/5000 – classe A;
- Considerando a exatidão planimétrica os modelos aproximados apresentaram melhores desempenhos se comparados com os modelos rigorosos;
- Pelos resultados de exatidões planimétricas obtidas pode-se afirmar que três modelos aproximados apresentam iguais desempenhos;
- De forma geral os cinco modelos testados apresentaram desempenhos semelhantes na determinação altimétrica. Em todos os modelos testados sempre ocorreu uma pequena tendenciosidade na determinação da componente altimétrica. De forma isolada, o modelo RFM foi o que apresentou melhor desempenho na determinação da coordenada altimétrica;
- Na inexistência dos coeficientes da RFM a transformação APM pode ser considerada como a mais apropriada para o experimento realizado tendo em vista as fortes correlações entre parâmetros que foram encontradas com a transformação DLT

TABELA 29 – EXATIDÕES PLANIALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM OS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS

Modelo Matemático	Planimetria		Altimetria	
	Média (m)	RMSE (m)	Média (m)	RMSE (m)
<b>MR9</b>	1,008	0,471	-0,921	1,168
<b>MR12</b>	0,992	0,445	-0,972	1,211
<b>RFM</b>	0,673	0,399	-0,669	1,073
<b>DLT</b>	0,655	0,337	-0,889	1,279
<b>APM</b>	0,648	0,392	-0,891	1,266

FONTE: O autor (2011)

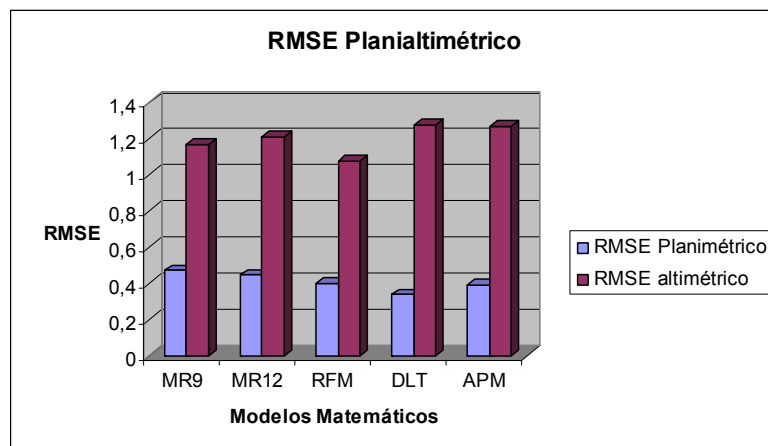


FIGURA 64 – GRÁFICO DE BARRAS DAS MÉDIAS E RMSE PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO APRESENTADOS NA TABELA 30  
FONTE: O autor (2011)

#### 4.2 ESTUDO DE CONFIGURAÇÃO DE PONTOS DE APOIO

Como foi tratado na metodologia desse trabalho de pesquisa - seção 3.3.5.2, os experimentos realizados nessa seção tem por objetivo principal avaliar o desempenho dos modelos aproximados e rigorosos com a redução do número de pontos de apoio em diferentes configurações de posicionamento dos mesmos nas imagens (FIGURA 65).

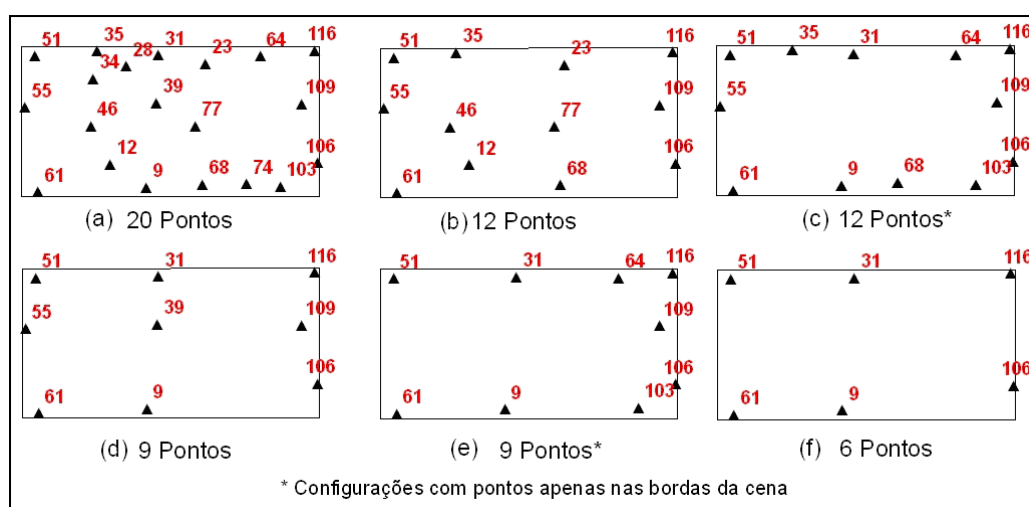


FIGURA 65 – PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES DE PONTOS  
FONTE: O autor (2011)



Pode-se observar na Figura 65, que a configuração inicial (a) possui 20 pontos de apoio bem distribuídos por toda a imagem, em seguida, reduziu-se esse número para 12, 9 e 6 pontos. Duas configurações são propostas para as quantidades de 12 e 9 pontos de apoio, sendo uma com distribuição de pontos somente nas bordas e outra com pontos de apoio no interior e nas bordas.

Conforme já mencionado na metodologia, as análises de desempenho dos modelos, com as diferentes configurações de pontos de apoio, foram realizadas com base nas discrepâncias planialtimétricas, obtidas com os mesmos 20 pontos de verificação que foram empregados nos experimentos de adequação de modelos. Os resultados do ajustamento por mínimos quadrados na orientação do modelo em cada uma das configurações de pontos de apoio não foram aqui considerados, pois não apresentaram variabilidades significativas. Em cada uma das configurações de pontos de apoio, as discrepâncias planialtimétricas dos pontos de verificação foram calculadas. A partir dessas, testes estatísticos foram realizados para verificação de enquadramento das exatidões planialtimétricas no PEC na escala de 1/5000. Inicialmente é realizado o teste de tendência das componentes, com base na distribuição normal. No caso de normalidade das discrepâncias, o enquadramento de exatidões ao PEC foi realizado com base no teste estatístico do Qui-Quadrado para o nível de significância de 10%. O valor calculado é comparado com o valor tabelado ( $\chi^2_{(19,10\%)} = 27,2$ ). Na verificação da exatidão altimétrica foi admitido como sendo o PEC em altimetria para escala de 1/5000 com curvas de nível com equidistância de 5 metros, o valor de 1,6449 vezes o erro padrão ou 90% dos pontos testados não deverão apresentar erros superiores ao PEC altimétrico estabelecido. Nessa condição, os erros padrões para classe A, B e C são (1,667), (2,0) e (2,5) metros respectivamente, resultando para o PEC altimétrico os valores de (2,74), (3,29) e (4,16) metros, respectivamente para as classes A, B e C. Com base nesses valores, as discrepâncias altimétricas dos 20 pontos de verificação foram analisadas para o enquadramento do PEC altimétrico.

#### 4.2.1 Experimentos com modelagem rigorosa com nove parâmetros – MR9

Na Tabela 30, Figuras 66 e 67 são apresentados os principais resultados obtidos das análises de exatidões planialtimétricas que foram realizadas com as configurações propostas de pontos de apoio.

TABELA 30 – RESULTADOS DAS ANÁLISES PARA O MODELO MR9

Config.	Coord.	$\mu_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$z_{calc}$	T	$\chi^2$	PEC	Dados adicionais de exatidão Planimétrica e Altimétrica	
20 pts	Este	-0,16	0,98	0,47	N	8,09	A	RMSE E(m)	0,96
	Norte	0,00	0,59	0,00	N	2,94	A	RMSE N(m)	0,57
	h	-0,92	1,29	2,46	S		A	RMSE_h(m)	1,55
12 pts	Este	-0,35	0,97	1,06	N	7,97	A	RMSE E(m)	1,01
	Norte	-0,01	0,58	0,03	N	2,83	A	RMSE N(m)	0,56
	h	-1,25	1,43	3,35	S		A	RMSE_h(m)	1,87
12* pts	Este	-0,30	0,99	0,90	N	8,21	A	RMSE E(m)	1,01
	Norte	-0,24	0,60	0,70	N	3,02	A	RMSE N(m)	0,63
	h	-2,03	1,29	5,46	S		C	RMSE_h(m)	2,39
9 pts	Este	-0,40	1,00	1,20	N	8,42	A	RMSE E(m)	1,05
	Norte	-0,20	0,64	0,59	N	3,41	A	RMSE N(m)	0,65
	h	-2,42	1,35	6,50	S		C	RMSE_h(m)	2,75
9* pts	Este	-0,30	0,99	0,90	N	8,21	A	RMSE E(m)	1,01
	Norte	-0,24	0,60	0,70	N	3,02	A	RMSE N(m)	0,63
	h	-2,03	1,29	5,46	S		C	RMSE_h(m)	2,39
6 pts	Este	-0,04	0,99	0,13	N	8,35	A	RMSE E(m)	1,08
	Norte	-0,15	0,72	0,44	N	4,33	A	RMSE N(m)	0,55
	h	-1,79	1,09	4,81	S		B	RMSE_h(m)	2,08

T=Teste Tendência; N=Não; S=Sim; SC=sem classe; nc=não convergiu

FONTE: O autor (2011)

Verifica-se na Tabela 30 e Figuras 66 e 67 que independente da configuração de pontos de apoio, a exatidão planimétrica obtida, pode ser enquadrada no PEC planimétrico para escala de 1/5000 – classe A. Pode-se afirmar que não existem alterações significativas na exatidão planimétrica com a diminuição dos pontos de apoio nas configurações propostas. Com respeito à exatidão altimétrica, verifica-se na Figura 66 que a tendenciosidade existente na determinação dessa componente foi mantida em todas as configurações testadas, sendo que a menor ocorreu na configuração (a) com 20 pontos de apoio e a maior

na configuração (e) com nove pontos de apoio nas bordas das imagens. Tendo em vista os diferentes valores de tendência na determinação altimétrica em cada uma das configurações, as exatidões em altimetria também variaram no enquadramento do PEC altimétrico, como se pode observar na Tabela 30. Pelos resultados obtidos das análises das discrepâncias altimétricas verificou-se que as configurações (a) e (b) de pontos de apoio foram enquadradas na classe A. As demais configurações foram enquadradas nas classes B e C.

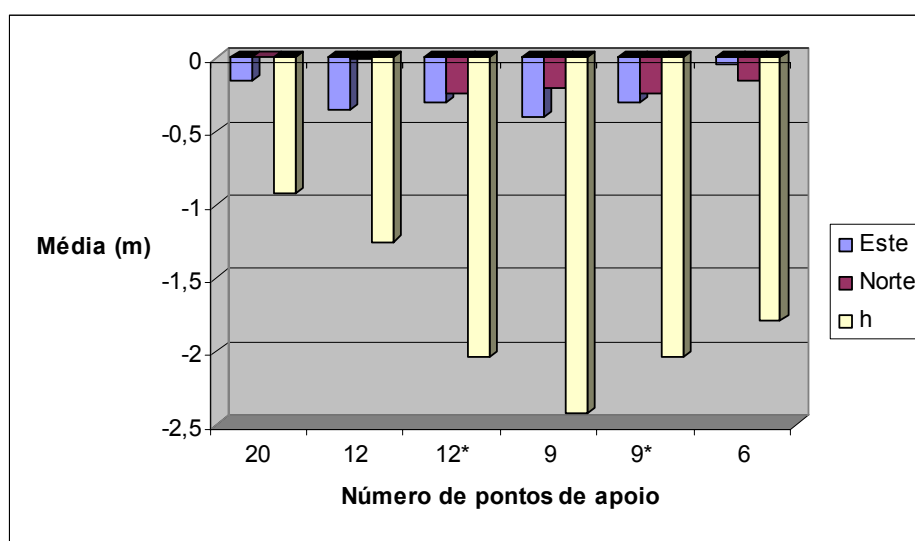


FIGURA 66 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR9  
 FONTE: O autor (2011)

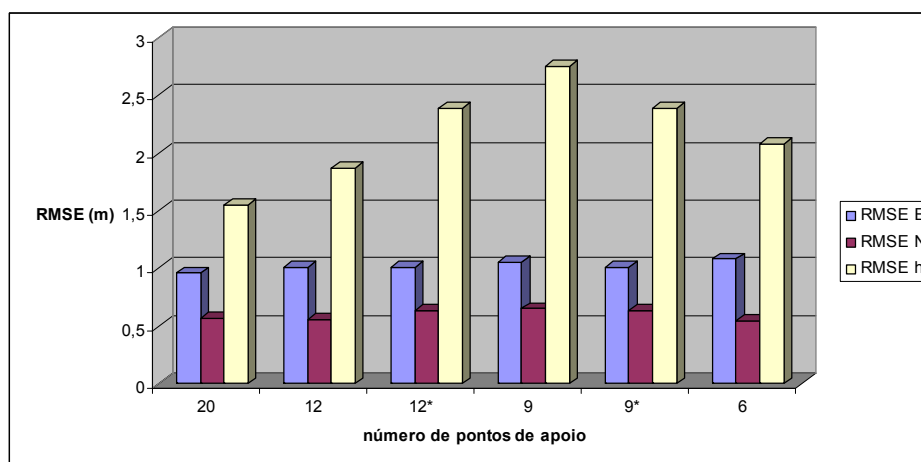


FIGURA 67 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR9  
 FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os valores das médias e desvios padrão para as coordenadas planimétricas, apresentados na Tabela 30, verifica-se que em todas as configurações de pontos de apoio não existiram tendências significativas, como foi verificado no teste de normalidade. Por outro lado, verifica-se na componente E maior dispersão das discrepâncias em todos os experimentos realizados. Esses resultados são similares os valores obtidos no experimento realizado para a adequação do modelo com 25 pontos de apoio, confirmando que as imagens possuem deformações provenientes do processo de correção geométrica que o modelo rigoroso MR9 não conseguiu parametrizar.

Pelos resultados obtidos com os experimentos aqui realizados com o modelo MR 9 com o propósito de analisar o comportamento do mesmo com diferentes configurações de pontos de apoio, pode-se considerar a configuração (f) com seis pontos de apoio distribuídos na borda das imagens como sendo a mais recomendada para a obtenção de informação planimétrica. Para a obtenção de informação altimétrica, a configuração (b) com 12 pontos de apoio distribuídos no interior e bordas das imagens foi a que apresentou melhor desempenho, pois a exatidão altimétrica foi enquadrada no PEC altimétrico na escala de 1/5000 - classe A com o menor número de pontos. É importante frisar que as conclusões obtidas encontram-se intimamente ligadas com as imagens utilizadas na pesquisa, portanto elas não são de ordem geral, podendo sofrer mudanças significativas quando outro par de imagens IKONOS II for utilizado no processo de orientação e determinação de coordenadas tridimensionais via intersecção espacial.

#### 4.2.2 Experimentos com modelagem rigorosa com doze parâmetros – MR12

Os resultados obtidos das análises estatísticas são apresentados na Tabela 31. Desses é possível verificar que o modelo MR12 apresentou exatidões planimétrica e altimétrica semelhantes às obtidas com o MR9, apenas nas configurações de pontos de apoio, de (a) a (d). As exatidões obtidas com a

configuração de pontos de apoio (e) – nove pontos de apoio distribuídos nas bordas das imagens – afastam-se completamente das obtidas com os outros experimentos. Diversas análises foram realizadas para encontrar uma justificativa para a baixa exatidão no experimento. A falta de bons valores aproximados para os parâmetros foi assumido como sendo a provável causa da instabilidade. Entretanto, mesmo utilizando os parâmetros determinados com a configuração de pontos (d) como sendo valores aproximados, os resultados de exatidões obtidas não sofreram alterações. Adicionalmente, verificou-se que os pontos de apoio da configuração (e), estando esses nas bordas das imagens e sendo os que possuem as maiores deformações devido ao processo de correção geométrica, provocaram grandes instabilidades no ajustamento do modelo. Essas correlações matemáticas causaram instabilidade matemáticas no processo de ajustamento devido à dependência linear entre parâmetros, como podem ser vistas nas Tabelas 32 e 33, que provavelmente ocasionaram imprecisões na determinação dos parâmetros.

No experimento realizado com a configuração (f), com seis pontos de apoio nas bordas das imagens, o ajustamento com solução única, não alcançou convergência. As causas do problema são as mesmas que foram apontadas na configuração de pontos de apoio (e).

Nas configurações de pontos de apoio de (a) até (d), as exatidões obtidas, igualmente como no caso do modelo MR9, podem ser enquadradas no PEC planimétrico para escala de 1/5000 – classe A. As exatidões para as coordenadas planimétricas, obtidas com base nas discrepâncias, mostradas nas Figuras 68 e 69, não tiveram alterações significativas nas configurações de pontos de apoio de (a) até (d). Com respeito a exatidão altimétrica, verifica-se na Figura 68 e Tabela 31 que existem diferentes tendências na componente altimétrica para as quatro configurações de pontos de apoio. As configurações (a) e (b) possuem exatidões altimétricas que permitem enquadrá-las no PEC altimétrico na escala de 1/5000 – classe A e as duas restantes na classe C.

TABELA 31 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA O MR12

Config.	Coord.	$\mu_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$z_{calc}$	T	$\chi^2$	PEC	Dados adicionais de exatidão Planimétrica e Altimétrica	
	Este	-0,13	0,95	0,37	N	7,64	A	RMSE E(m)	0,93
20 pts	Norte	0,04	0,59	0,11	N	2,9	A	RMSE N(m)	0,57
(a)	h	-0,96	1,31	2,58	S		A	RMSE_h(m)	1,59
	Este	-0,37	0,95	1,11	N	7,61	A	RMSE E(m)	0,99
12 pts	Norte	0,05	0,55	0,14	N	2,53	A	RMSE N(m)	0,53
(b)	h	-1,14	1,45	3,07	S		A	RMSE_h(m)	1,82
	Este	-0,93	1,13	2,77	N	10,9	A	RMSE E(m)	1,44
12* pts	Norte	-0,26	0,62	0,78	N	3,24	A	RMSE N(m)	0,65
(c)	h	-2,36	1,49	6,33	S		C	RMSE_h(m)	2,77
	Este	-0,45	1,07	1,35	N	9,74	A	RMSE E(m)	1,14
9 pts	Norte	-0,17	0,62	0,50	N	3,29	A	RMSE N(m)	0,63
(d)	h	-2,42	1,35	6,50	S		C	RMSE_h(m)	2,75
	Este	11,23	13,65	33,50	S			RMSE E(m)	17,4
9* pts	Norte	1,28	1,92	3,83	S			RMSE N(m)	2,26
(e)	h	7,06	12,17	18,94	S			RMSE_h(m)	13,8
	Este	nc	nc	nc				RMSE E(m)	
6 pts	Norte	nc	nc	nc				RMSE N(m)	
(f)	h	nc	nc	nc				RMSE_h(m)	

T=Teste Tendência; N=Não; S=Sim; SC=sem classe; nc=não convergiu

FONTE: O autor (2011)

TABELA 32 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - IMAGEM 1- MR12 – PARA A CONFIGURACAO (E) DE PONTOS DE APOIO

	k	$\varphi$	$\omega$	X0	Y0	Z0	a1	a2	a3	b1	b2	b3
k	1	-0.01	0.34	-0.01	-0.33	-0.02	0.01	0.22	-0.01	-0.01	-0.22	0.01
$\varphi$	-0.01	1	0.00	1.00	-0.13	1.00	-0.97	-0.69	0.90	0.97	0.69	-0.91
$\omega$	0.34	0.00	1	0.00	-0.99	-0.04	0.00	0.65	0.01	0.00	-0.65	-0.01
X0	-0.01	1.00	0.00	1	-0.13	1.00	-0.97	-0.69	0.90	0.97	0.69	-0.91
Y0	-0.33	-0.13	-0.99	-0.13	1	-0.09	0.13	-0.55	-0.13	-0.13	0.55	0.13
Z0	-0.02	1.00	-0.04	1.00	-0.09	1	-0.97	-0.71	0.90	0.97	0.71	-0.90
a1	0.01	-0.97	0.00	-0.97	0.13	-0.97	1	0.75	-0.98	-1.00	-0.75	0.98
a2	0.22	-0.69	0.65	-0.69	-0.55	-0.71	0.75	1	-0.76	-0.75	-1.00	0.76
a3	-0.01	0.90	0.01	0.90	-0.13	0.90	-0.98	-0.76	1	0.98	0.76	-1.00
b1	-0.01	0.97	0.00	0.97	-0.13	0.97	-1.00	-0.75	0.98	1	0.75	-0.98
b2	-0.22	0.69	-0.65	0.69	0.55	0.71	-0.75	-1.00	0.76	0.75	1	-0.76
b3	0.01	-0.91	-0.01	-0.91	0.13	-0.90	0.98	0.76	-1.00	-0.98	-0.76	1

FONTE: O autor (2011)

TABELA 33 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS - IMAGEM 2- MR12 - PARA A CONFIGURACAO (E) DE PONTOS DE APOIO

	k	$\phi$	$\omega$	X0	Y0	Z0	a1	a2	a3	b1	b2	b3
k	1	0.00	0.35	0.00	-0.35	0.29	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00
$\phi$	0.00	1	0.00	1.00	0.15	0.54	-0.98	0.94	0.94	0.98	-0.94	-0.94
$\omega$	0.35	0.00	1	0.00	-0.99	0.84	0.00	0.02	-0.01	0.00	-0.02	0.01
X0	0.00	<b>1.00</b>	0.00	1	0.15	0.54	-0.98	0.94	0.94	0.98	-0.94	-0.94
Y0	-0.35	0.15	<b>-0.99</b>	0.15	1	-0.75	-0.15	0.12	0.14	0.15	-0.12	-0.14
Z0	0.29	0.54	0.84	0.54	-0.75	1	-0.52	0.52	0.49	0.53	-0.52	-0.49
a1	0.00	<b>-0.98</b>	0.00	<b>-0.98</b>	-0.15	-0.52	1	-0.99	-0.99	-1.00	0.99	0.99
a2	0.01	<b>0.94</b>	0.02	<b>0.94</b>	0.12	0.52	<b>-0.99</b>	1	1.00	0.99	-1.00	-1.00
a3	0.00	<b>0.94</b>	-0.01	<b>0.94</b>	0.14	0.49	<b>-0.99</b>	<b>1.00</b>	1	0.99	-1.00	-1.00
b1	0.00	<b>0.98</b>	0.00	<b>0.98</b>	0.15	0.53	<b>-1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	1	-0.99	-0.99
b2	-0.01	<b>-0.94</b>	-0.02	<b>-0.94</b>	-0.12	-0.52	<b>0.99</b>	<b>-1.00</b>	<b>-1.00</b>	<b>-0.99</b>	1	1.00
b3	0.00	<b>-0.94</b>	0.01	<b>-0.94</b>	-0.14	-0.49	<b>0.99</b>	<b>-1.00</b>	<b>-1.00</b>	<b>-0.99</b>	<b>1.00</b>	1

FONTE: O autor (2011)

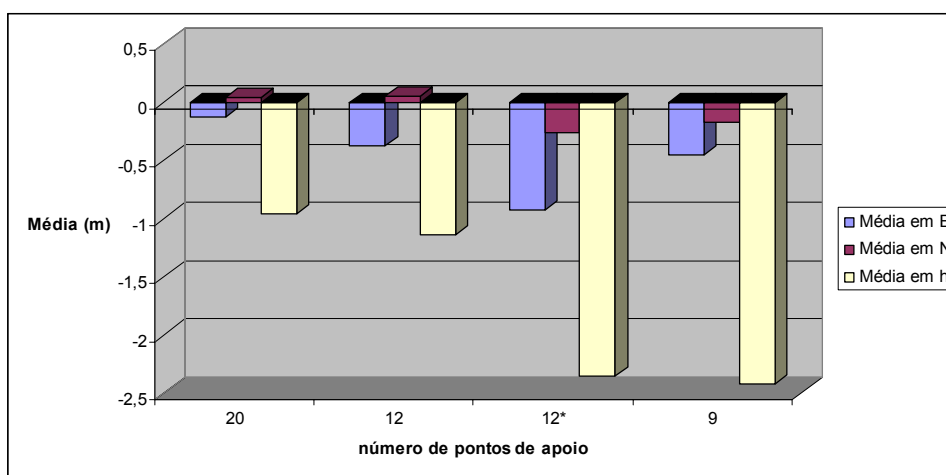


FIGURA 68 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR12

FONTE: O autor (2011)

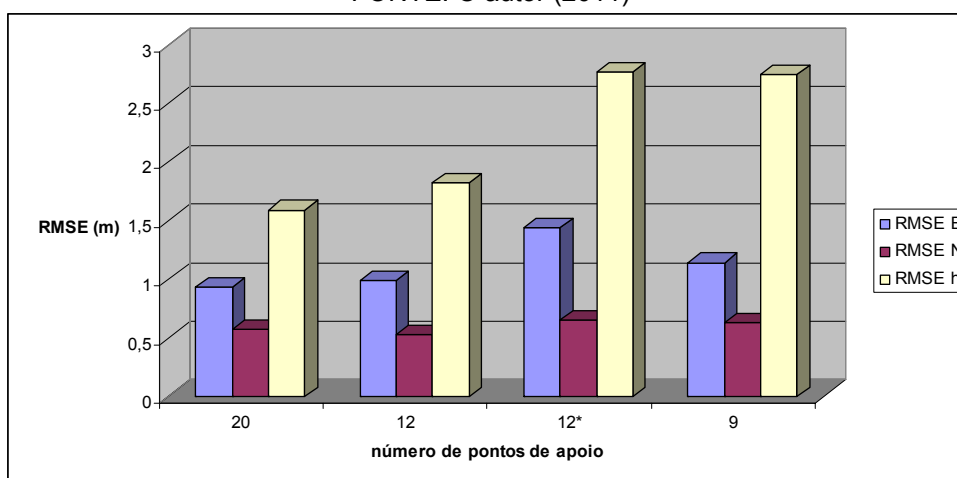


FIGURA 69 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO MR12

FONTE: O autor (2011)

De forma similar aos resultados obtidos com o modelo MR9, as discrepâncias encontradas na análise de exatidão planimétrica com o modelo MR12, resultou valores de médias e desvios padrão nas componentes planimétricas que permitem concluir a inexistência de tendências significativas nas configurações de pontos de apoio de (a) até (d), como pode ser verificado nos testes de normalidade apresentados na Tabela 31. Verifica-se que as discrepâncias na componente E apresentam maiores dispersões em relação à média, como pode ser visto na Tabela 31 pelos desvios padrão obtidos nos experimentos realizados com as configurações de ponto de apoio de (a) até (d). Esses resultados são similares aos obtidos com o modelo MR9, mostrando também a impossibilidade do modelo MR12 parametrizar as deformações presentes nas imagens.

Analisando-se a exatidão planimétrica determinada nos experimentos realizados com o modelo MR12 nas quatro configurações iniciais de pontos de apoio e associado com análises já feitas sobre o comportamento do modelo, pode-se concluir que a configuração (d) de pontos de apoio é a melhor para a obtenção da planimetria. Decidiu-se por essa configuração por ser a que possui menor número de pontos de apoio, sendo que a exatidão planimétrica é praticamente igual nas quatro configurações testadas. A configuração (b) com 12 pontos de apoio pode ser considerada como sendo a mais indicada para a obtenção de informação altimétrica. Essa configuração foi a escolhida em função do menor número de pontos de apoio quando comparada com a configuração (a) de 20 pontos que foi também enquadrada na classe A do PEC altimétrico. Como já mencionado, essas conclusões estão ligadas com as imagens utilizadas na pesquisa e o experimento realizado.



### 4.2.3 Experimentos com a RFM

O modelo RFM com os seus coeficientes determinados pelo fornecedor das imagens foi analisado para a determinação de coordenadas tridimensionais via intersecção espacial, empregando um par estereoscópico IKONOS II orientado com diferentes configurações de pontos de apoio. A utilização desse modelo nessa aplicação pode ser realizada com ou sem nenhum ponto de apoio. Sendo assim, além das configurações de pontos de apoio propostas, utilizou-se de mais duas configurações adicionais. A primeira - configuração (g), com quatro pontos de apoio, sendo um ponto em cada canto das imagens e a segunda – configuração (h), com somente um ponto de apoio no centro das imagens. Os resultados da análise das discrepâncias obtidas dos experimentos realizados com as diferentes configurações de pontos de apoio são apresentados na Tabela 34.

TABELA 34 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA DISCREPÂNCIA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO COM A RFM

Config.	Coord.	$\mu_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$z_{calc}$	T	$\chi^2$	PEC	Dados adicionais de exatidão Planimétrica e Altimétrica	
20 pts (a)	Este	0,1	0,45	0,28	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,45
	Norte	-0,01	0,63	0,03	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,61
	h	-0,6	1,1	1,64	S		A	RMSE_h(m)	1,23
12 pts (b)	Este	-0,06	0,45	0,17	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,44
	Norte	-0,06	0,63	0,17	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,62
	h	-0,75	1,1	2,01	S		A	RMSE_h(m)	1,31
12* pts (c)	Este	0,05	0,45	0,14	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,44
	Norte	-0,11	0,63	0,34	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,63
	h	-1,31	1,1	3,53	S		A	RMSE_h(m)	1,69
9 pts (d)	Este	0,08	0,45	0,25	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,44
	Norte	-0,01	0,63	0,02	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,61
	h	-1,53	1,1	4,11	S		A	RMSE_h(m)	1,86
9* pts (e)	Este	0,16	0,45	0,48	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,47
	Norte	-0,04	0,63	0,12	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,61
	h	-1,69	1,1	4,54	S		B	RMSE_h(m)	2,01
6 pts (f)	Este	0,16	0,45	0,48	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,47
	Norte	-0,06	0,63	0,18	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,62
	h	-0,75	1,1	2,02	S		A	RMSE_h(m)	1,31

	Este	-0.13	0.45	0.40	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,46
4 pts	Norte	-0.33	0.63	0.99	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,7
(g)	h	-1.17	1.10	3.13	S		A	RMSE_h(m)	1,58
	Este	-0,22	0,45	0,66	N	1,74	A	RMSE E(m)	0,49
1 pto	Norte	0,12	0,63	0,36	N	3,39	A	RMSE N(m)	0,62
(h)	h	-1,55	1,10	4,61	S		B	RMSE_h(m)	2,01
	Este	1,9	0,5	5,6	S	1,77	-	RMSE E(m)	1,94
sem pts	Norte	-4,6	0,6	13,6	S	3,39	-	RMSE N(m)	4,61
(i)	h	-12,9	1,1	34,5	S		-	RMSE_h(m)	12,91

T=Teste Tendência; N=Não; S=Sim; SC=sem classe; nc=não convergiu

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 34, Figuras 70 e 71, verifica-se para todas as configurações de pontos de apoio testadas que a exatidão para as coordenadas planimétricas obtida nas diferentes configurações possuem valores praticamente iguais e com os testes estatísticos de Qui-Quadrado realizados com nível de significância de 10%, todas as exatidões planimétricas determinadas podem ser enquadradas no PEC planimétrico para escala de 1/5000 – classe A. Com relação a exatidão altimétrica verifica-se que em função da configuração de pontos de apoio tem-se diferentes tendências na componente altimétrica, entretanto a grande maioria das exatidões obtidas podem ser enquadradas no PEC altimétrico na escala de 1/5000 – classe A. Somente a configuração (e) com 9 pontos de apoio e a configuração (i) com somente um ponto foram classificadas na classe B. Como previsto, esses resultados mostram que o modelo RFM proporciona melhor exatidão altimétrica se comparado com os modelos rigorosos aqui testados.

Por outro lado, observa-se que a tendência na determinação da componente altimétrica se mantém em todas as configurações de pontos de apoio testadas. Esses resultados têm comportamento não esperado em função da hipótese admitida para a existência de tendência na determinação altimétrica em todos os experimentos realizados até aqui. Admitiu-se que o problema estava relacionado com as distorções nas imagens provocadas pela correção geométrica realizada com base no modelo RFM. Desta forma, esperava-se que a tendenciosidade fosse modelada nesses experimentos. A causa para a não parametrização da tendência

pode estar relacionada com o procedimento utilizado. A modelagem da função RFM com a adição de pontos de apoio, não altera os coeficientes das funções polinomiais, somente ajusta uma função linear que corrige as medidas (linha e coluna) para compatibilizar os valores determinados na função. Desta forma, pode-se concluir que existe uma imprecisão nos coeficientes da função (RPC) que causam o problema. Isto pode ser facilmente visto no resultado obtido no experimento realizado sem nenhum ponto de apoio. Verifica-se neste que a tendência constatada é dez vezes maior que os valores obtidos com a utilização de pontos de apoio. Por outro lado, comparando-se as médias das discrepâncias altimétricas ocorridas com os experimentos com e sem pontos de apoio, verifica-se um ganho considerável quando pelo menos um ponto de apoio é utilizado no processo. Também foi observado que a tendência na determinação da componente altimétrica parece ser dependente da configuração de pontos de apoio. Na Figura 70 constata-se para cada configuração um valor diferente de média das discrepâncias altimétricas (tendências). Esses valores de tendência refletem-se nos diferentes valores dos erros médio quadrático altimétrico, calculados para cada configuração de pontos de apoio, como podem ser vistos na Figura 71. Considerando o rigor matemático e estatístico da determinação altimétrica e seus valores de desvios padrão, pode-se concluir que em todas as configurações de pontos de apoio, resultaram numa determinação da coordenada altimétrica precisa, mas não exata.

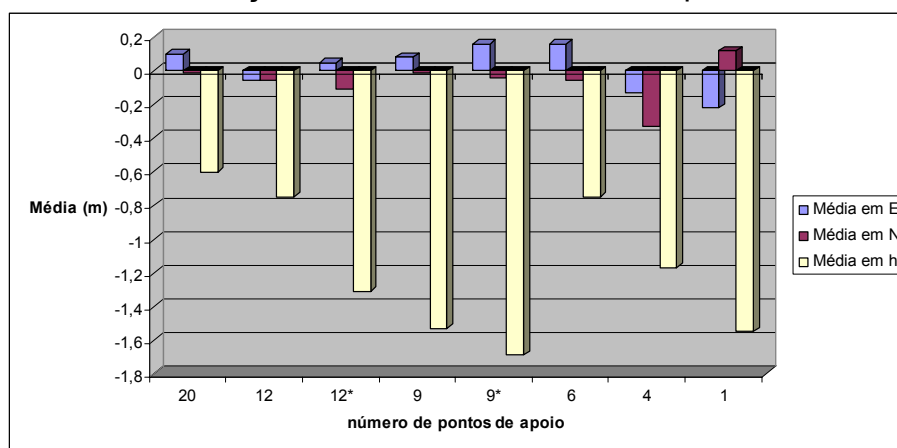


FIGURA 70 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM  
FONTE: O autor (2011)

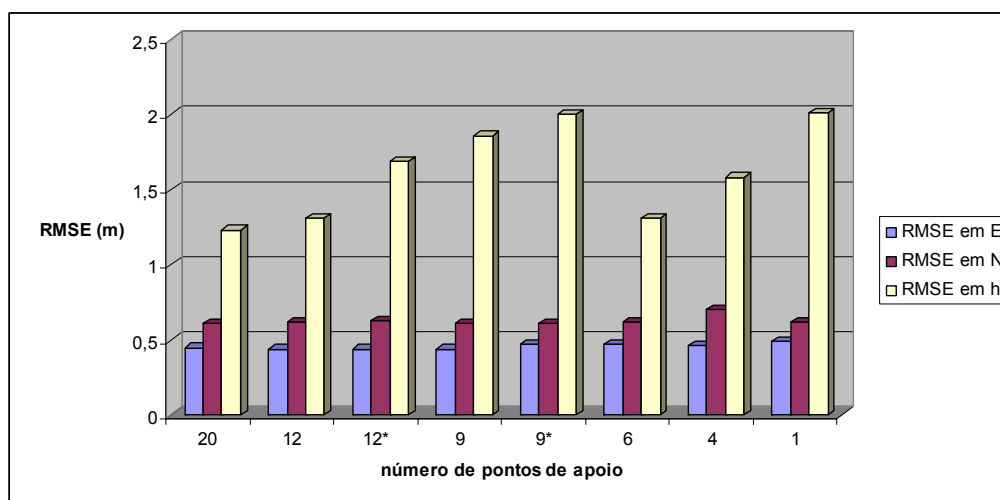


FIGURA 71 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM  
 FONTE: O autor (2011)

Em função dos resultados obtidos nos experimentos discutidos anteriormente pode-se pensar que uma das grandes vantagens desse modelo é a possibilidade de determinação de coordenadas tridimensionais com a configuração de somente um ponto de apoio. A exatidão planimétrica obtida com essa configuração mínima de pontos de apoio, para o par de imagens utilizado, encontra-se enquadrada no PEC planimétrico na escala de 1/5000 – classe A o que representa a maioria das exatidões obtidas com diferentes configurações de pontos de apoio. Por outro lado ao se analisar as Figuras 72 e 73, verifica-se que o valor da média das discrepâncias altimétricas (tendência na determinação da componente altimétrica) com a configuração de somente um ponto é totalmente dependente da deformação que o ponto tem. Na Figura 72 observa-se que a maior tendência negativa ocorreu com a utilização do ponto de apoio 103 e com a utilização do ponto de apoio 77 uma tendência positiva. Verificou-se ainda que essa variabilidade na tendência está relacionada com a posição do ponto nas imagens, pois o ponto 77 na região central da imagem causa tendência completamente diferente do que ocorre com a utilização do ponto 39, também próximo do centro da imagem.

Dentro desse contexto, a configuração de somente um ponto de apoio não possui confiabilidade para a realização do experimento quando a determinação

precisa para a componente altimétrica for requerida. Contudo se apenas a planimetria for determinada, a configuração de somente um ponto de apoio pode ser considerada como sendo a melhor opção para a realização do experimento proposto com o modelo RFM. Por outro lado, considerando os resultados obtidos nos experimentos realizados com configuração maior que um ponto, a configuração (f) com seis pontos de apoio nas bordas das imagens pode ser considerada como sendo a melhor opção para a realização do experimento.

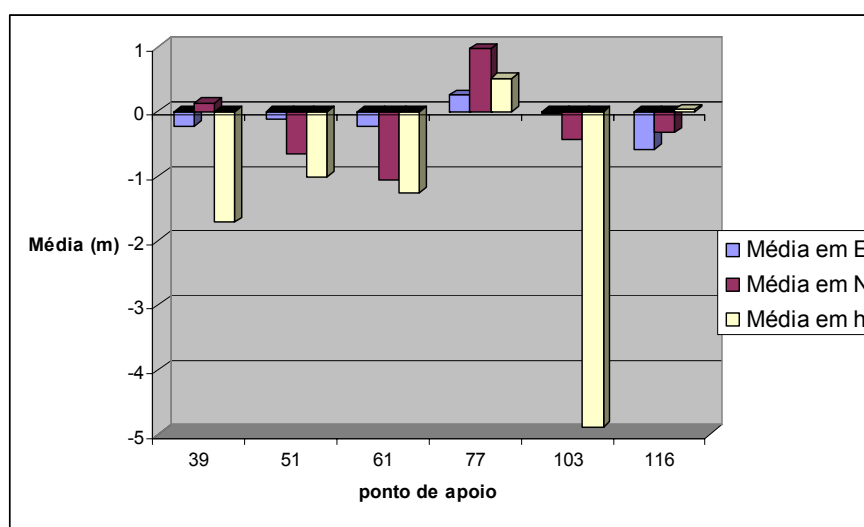


FIGURA 72 – MÉDIA DA DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM UM PONTO DE APOIO  
FONTE: O autor (2011)

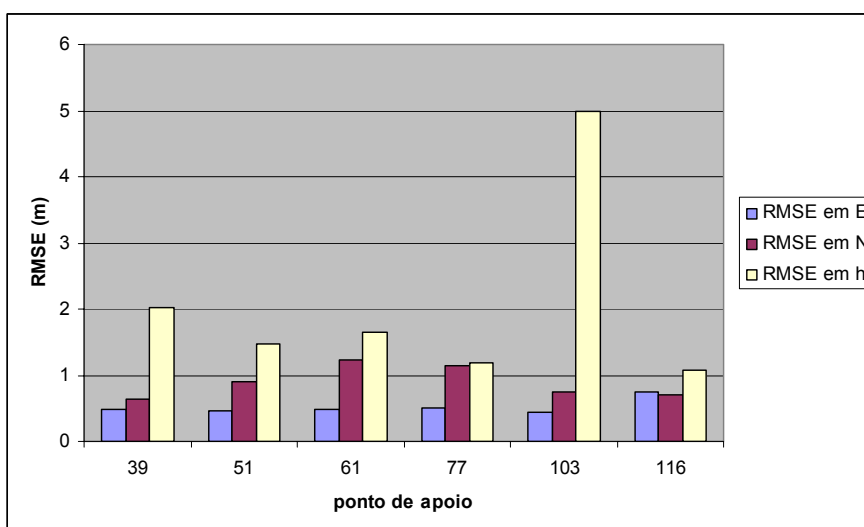


FIGURA 73 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM UM PONTO DE APOIO  
FONTE: O autor (2011)

Apesar de ser concluído que a configuração (f) de pontos de apoio é a mais apropriada para a realização do experimento quando a determinação altimétrica for requerida, realizou-se um estudo para a análise da estabilidade da exatidão altimétrica em função de diferentes configurações com seis pontos de apoio. As configurações de seis pontos empregadas nesse estudo, não apresentam rigor geométrico lógico para a aplicação em questão. Essas foram empregadas somente com o intuito de confirmar que a tendência altimétrica é função da configuração de pontos de apoio utilizada. Esse estudo foi motivado pela variabilidade da tendência altimétrica constatada nas diferentes configurações de somente um ponto de apoio. Os principais resultados obtidos nesse estudo são apresentados nas Figuras 74, 75 e 76. Como já visto nas configurações com somente um ponto de apoio, o comportamento da tendência altimétrica se repete com as configurações avaliadas. Os resultados obtidos com a configuração (a) são novamente apresentados no estudo, somente para fins de comparação. Como pode ser visto na Figura 75, a configuração (c), completamente ilógica para o tipo de aplicação, permitiu a determinação da componente altimétrica sem nenhuma tendência. Por outro lado, na configuração (d), também sem nenhuma condição geométrica, tem-se uma tendência na altimetria completamente diferente. Como já visto nos outros experimentos realizados com o modelo RFM, os valores de erros médio quadrático da determinação da componente altimétrica sofreram alterações com as diferentes configurações de seis pontos de apoio testadas. Esses resultados comprovam que a tendência altimétrica no experimento realizado com o modelo RFM é função da configuração de pontos de apoio.

Admitindo o rigor na determinação altimétrica e pensando numa aplicação real, as configurações de seis pontos de apoio (b), (c) e (d) nunca seriam utilizadas, pois como já mencionado, são configurações sem nenhum rigor geométrico para a aplicação. De forma que a configuração (f) de pontos de apoio continua sendo a mais adequada para o experimento quando a determinação da componente

altimétrica for requerida. Como já mencionado, a utilização da configuração com somente um ponto de apoio é recomendada somente para a determinação planimétrica, pois na altimétrica, a exatidão fica condicionada à posição do ponto.

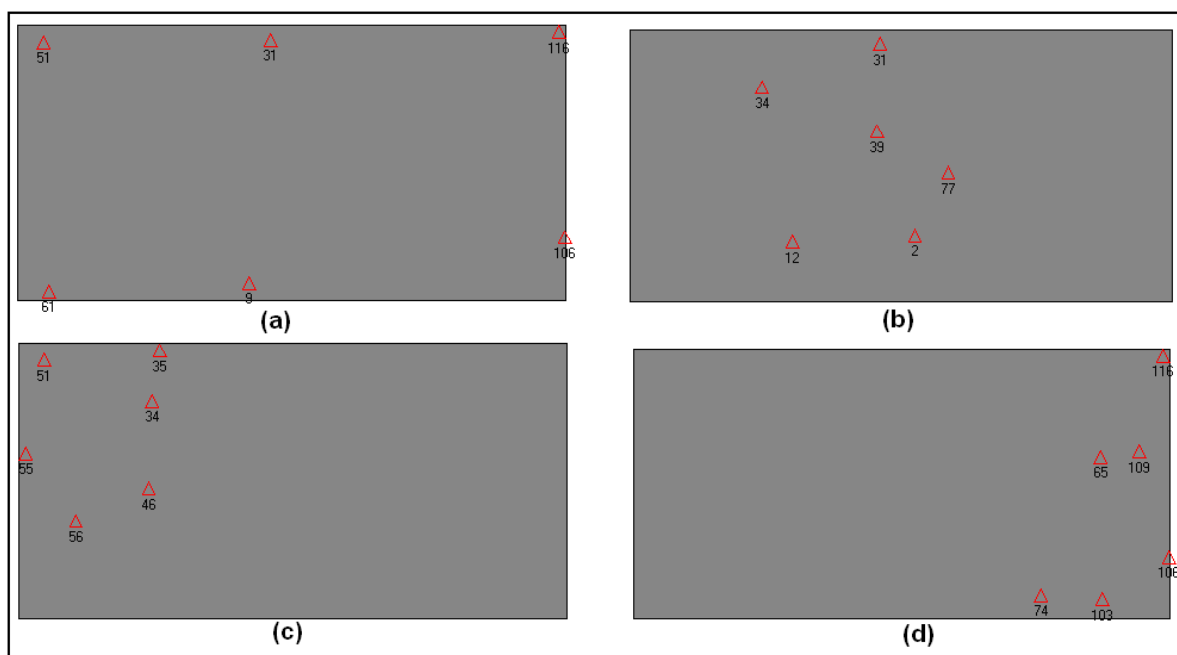


FIGURA 74 – CONFIGURAÇÕES COM SEIS PONTOS DE APOIO  
FONTE: O autor (2011)

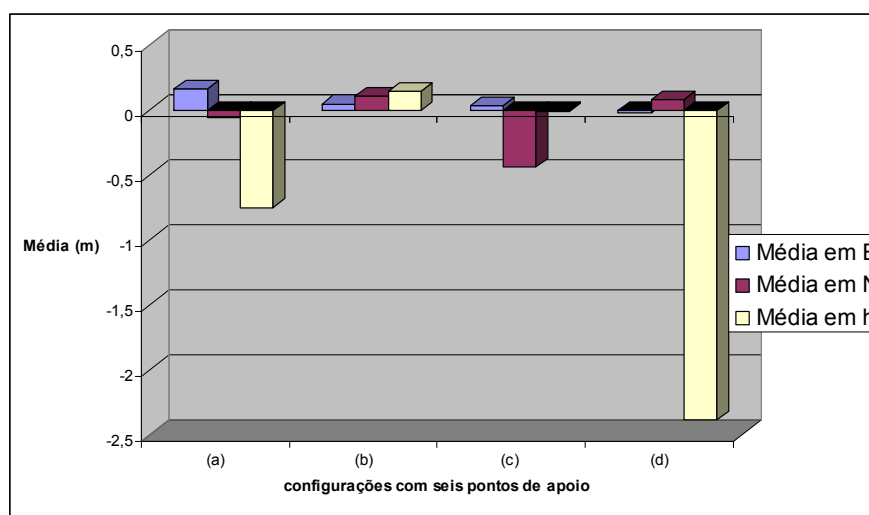


FIGURA 75 – MÉDIA DA DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM SEIS PONTOS DE APOIO  
FONTE: O autor (2011)

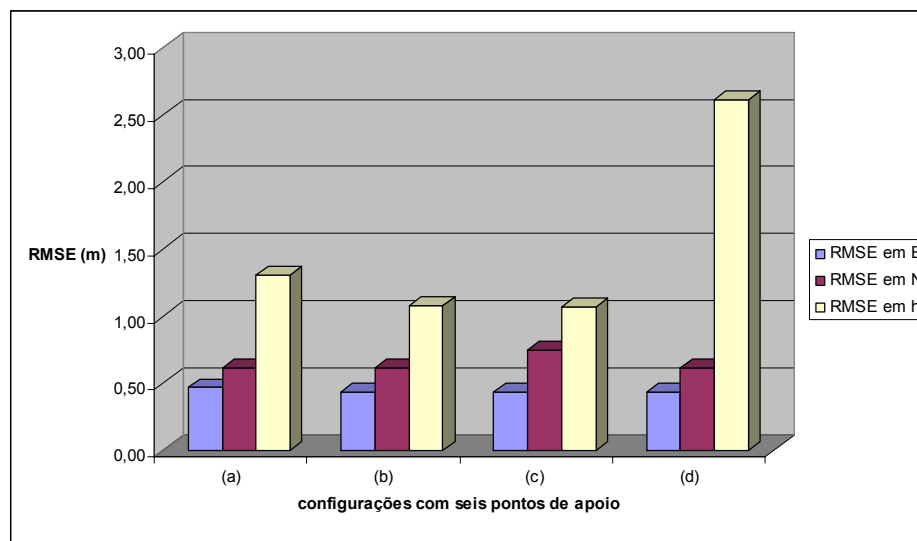


FIGURA 76 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO RFM - CONFIGURAÇÕES COM SEIS PONTOS DE APOIO  
 FONTE: O autor (2011)

#### 4.2.4 Experimento com modelagem matemática DLT

Apesar da transformação matemática DLT apresentar altas correlações entre parâmetros e ser considerada como sendo uma transformação super-parametrizada nessa aplicação, como visto na adequação do modelo (seção 4.1.4), os experimentos para verificar a configuração de pontos apoio mais apropriada foram também realizados. Ainda que o modelo não tenha sido fortemente recomendado, justifica-se a investigação aqui proposta, pelos excelentes resultados de exatidões planialtimétricas obtidos no experimento que analisou a adequação do modelo na determinação de coordenadas tridimensionais via intersecção espacial.

As discrepâncias dos pontos de verificação determinadas nos experimentos realizados com as diferentes configurações de pontos de apoio, foram estatisticamente analisadas. Os principais resultados dessa análise são apresentados na Tabela 35.



TABELA 35 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA DISCREPÂNCIA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO COM A DLT

Config.	Coord.	$\mu_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$z_{calc}$	T	$\chi^2$	PEC	Dados adicionais de exatidão Planimétrica e Altimétrica	
20 pts	Este	-0,04	0,51	0,13	N	2,21	A	RMSE E(m)	0,50
	Norte	0,02	0,55	0,06	N	2,52	A	RMSE N (m)	0,53
	h	-0,86	1,37	2,30	<b>S</b>		<b>A</b>	RMSE_h(m)	1,59
12 pts	Este	0,02	0,55	0,06	N	2,56	A	RMSE E(m)	0,53
	Norte	0,09	0,49	0,27	N	1,99	A	RMSE N (m)	0,48
	h	-0,87	1,72	2,34	<b>S</b>		<b>A</b>	RMSE_h(m)	1,88
12* pts	Este	0,02	0,50	0,07	N	2,10	A	RMSE E(m)	0,48
	Norte	-0,11	0,53	0,33	N	2,33	A	RMSE N (m)	0,52
	h	-1,34	1,40	3,60	<b>S</b>		<b>B</b>	RMSE_h(m)	1,91
9 pts	Este	0,30	0,47	0,90	N	1,87	A	RMSE E(m)	0,55
	Norte	-0,07	0,59	0,21	N	2,90	A	RMSE N (m)	0,57
	h	-1,95	1,41	5,24	<b>S</b>		<b>C</b>	RMSE_h(m)	2,38
9* pts	Este	0,18	0,44	0,54	N	1,64	A	RMSE E(m)	0,46
	Norte	-0,14	0,52	0,43	N	2,31	A	RMSE N (m)	0,53
	h	-1,83	1,45	4,91	<b>S</b>		<b>C</b>	RMSE_h(m)	2,31
6 pts	Este	0,26	0,43	0,76	N	1,55	A	RMSE E(m)	0,49
	Norte	0,00	0,77	0,01	N	4,95	A	RMSE N (m)	0,74
	h	-1,59	1,39	4,27	<b>S</b>		<b>B</b>	RMSE_h(m)	2,08

T=Teste Tendência; N=Não; **S**=Sim; SC=sem classe; nc=não convergiu

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 35, Figuras 77 e 78 e considerando as seis principais configurações de pontos de apoio, verifica-se que a exatidão para as coordenadas planimétricas obtidas nos experimentos realizados com a DLT são similares às que foram obtidas com os experimentos realizados com a RFM. Igualmente como visto no RFM, todas as exatidões obtidas foram enquadradas, com base no teste estatístico do Qui-Quadrado com nível de 10% de significância, no PEC planimétrico para a escala de 1/5000 – classe A. Com relação à exatidão altimétrica, como era prevista, a pequena tendência na determinação dessa componente foi mantida. O comportamento da tendência altimétrica é função da configuração dos pontos de apoio, como pode ser observado Figura na 77. Como já observado no modelo RFM, o valor do erro médio quadrático na altimetria, em cada uma das configurações de pontos de apoio, refletem a tendência altimétrica

existente, como pode ser verificado na Figura 78. Considerando os valores de desvios padrão apresentados na Tabela 35, verifica-se que independente da configuração de pontos de apoio utilizada, a determinação da componente altimétrica sempre foi realizada com precisão similar, mas com diferentes exatidões, como mostrados nos diferentes valores de erro médio quadrático em cada configuração. Os resultados de exatidão altimétrica em função da configuração de pontos de apoio são inferiores aos obtidos com o modelo RFM, pois somente as duas primeiras configurações de pontos de apoio (a) e (b) resultaram exatidões que puderam ser enquadradas no PEC altimétrico na escala de 1/5000 – classe A. As demais foram enquadradas nas classes B e C.

Com respeito a tendência sempre existente na determinação altimétrica, verifica-se que a mesma não se verificou somente com a transformação DLT, mas sim com todos os modelos testados nessa pesquisa o que se leva a inferir a grande possibilidade da existência de um erro sistemático não parametrizado nos parâmetros RPC. Entretanto, se for considerado o valor da precisão tolerável na determinação da componente altimétrica via intersecção espacial, os resultados obtidos de exatidão altimétrica na maioria dos experimentos realizados podem ser considerados como sendo admissíveis.

Analisando-se de forma individual o comportamento da DLT com as configurações de pontos de apoio testadas, admite-se a configuração (b) com 12 pontos de apoio como sendo a mais apropriada para a determinação altimétrica e no caso de aplicação exclusiva para a determinação planimétrica a configuração (f) com seis pontos de apoio pode ser considerada como a mais indicada.

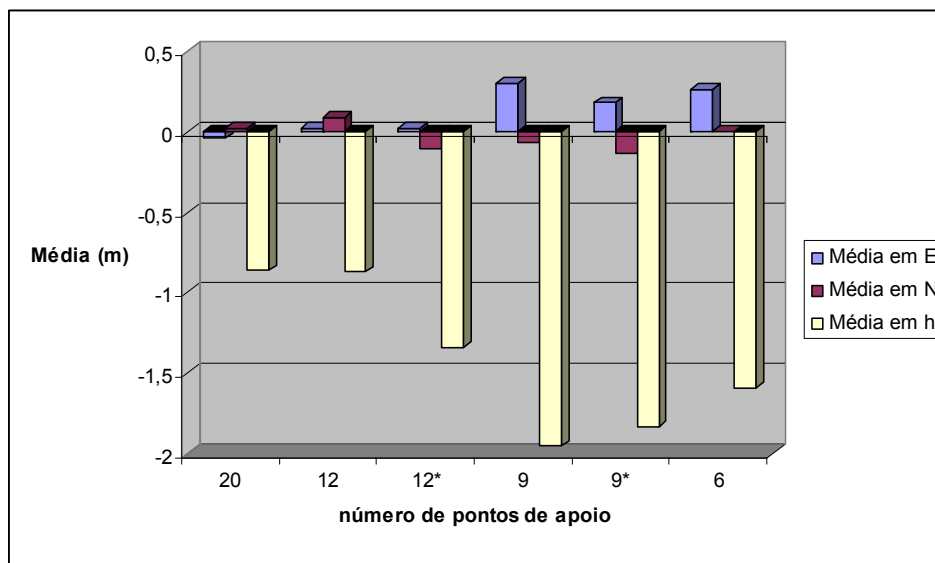


FIGURA 77 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO DLT

FONTE: O autor (2011)

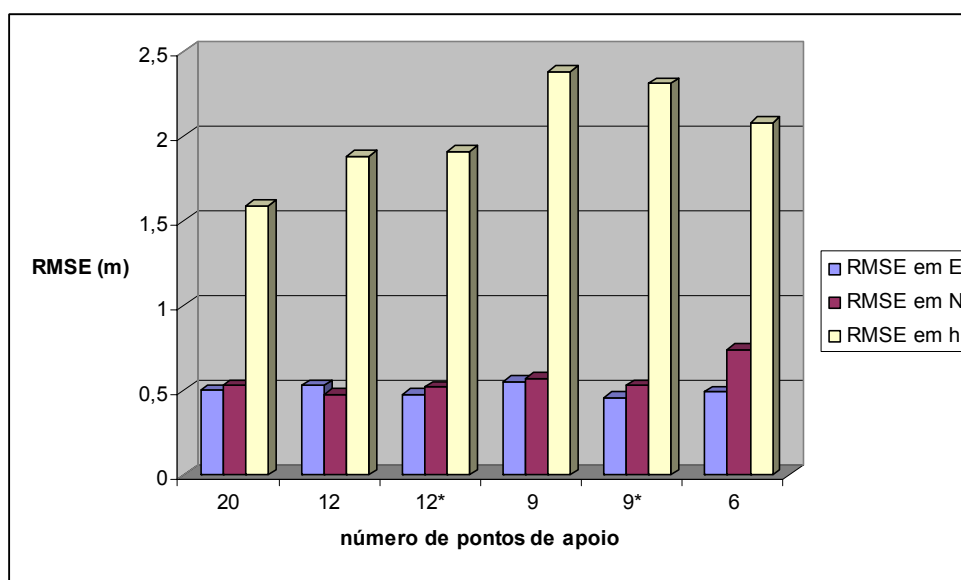


FIGURA 78 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO DLT

FONTE: O autor (2011)

#### 4.2.5 Experimento com modelo matemático APM

Experimentos para a determinação da melhor configuração de pontos de apoio com a transformação Afim de Projeção Paralela – APM foram realizados empregando as seis principais configurações de pontos de apoio. De todos os

modelos matemáticos empregados para a orientação de um par estereoscópico IKONOS II visando a determinação tridimensional de coordenadas via intersecção espacial, o APM foi considerado como sendo o que oferece as maiores facilidades de programação computacional e resolução do sistema de equações.

As discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação determinadas nos experimentos realizados com as diferentes configurações de pontos de apoio, foram estatisticamente analisadas. Os principais resultados dessa análise são apresentados na Tabela 36.

TABELA 36 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA DISCREPÂNCIA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO COM A APM

Config.	Coord.	$\mu_{\Delta X}$ (m)	$\sigma_{\Delta X}$ (m)	$z_{calc}$	T	$\chi^2$	PEC	Dados adicionais de exatidão Planimétrica e Altimétrica	
20 pts (a)	Este	-0,05	0,54	0,15	N	2,49	A	RMSE E (m)	0,53
	Norte	0,01	0,55	0,03	N	2,59	A	RMSE N (m)	0,54
	h	-0,85	1,36	2,29	S		A	RMSE_h(m)	1,57
12 pts (b)	Este	-0,04	0,58	0,11	N	2,82	A	RMSE E (m)	0,56
	Norte	0,02	0,54	0,06	N	2,47	A	RMSE N (m)	0,53
	h	-1,06	1,5	2,86	S		A	RMSE_h(m)	1,81
12* pts (c)	Este	-0,02	0,52	0,06	N	2,3	A	RMSE E (m)	0,51
	Norte	-0,16	0,57	0,47	N	2,72	A	RMSE N (m)	0,57
	h	-1,35	1,36	3,62	S		B	RMSE_h(m)	1,89
9 pts (d)	Este	0,11	0,49	0,32	N	2,03	A	RMSE E (m)	0,49
	Norte	-0,12	0,58	0,37	N	2,89	A	RMSE N (m)	0,58
	h	-1,96	1,37	5,25	S		C	RMSE_h(m)	2,37
9* pts (e)	Este	0,07	0,5	0,22	N	8,21	A	RMSE E (m)	0,49
	Norte	-0,2	0,56	0,58	N	3,02	A	RMSE N (m)	0,58
	h	-1,81	1,43	4,86	S		C	RMSE_h(m)	2,28
6 pts (f)	Este	0,18	0,51	0,53	N	8,35	A	RMSE E (m)	0,53
	Norte	-0,11	0,67	0,33	N	4,33	A	RMSE N (m)	0,66
	h	-1,6	1,17	4,28	S		B	RMSE_h(m)	1,96

T=Teste Tendência; N=Não; S=Sim; SC=sem classe; nc=não convergiu

FONTE: O autor (2011)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 36, Figuras 79 e 80 e considerando as seis principais configurações de pontos de apoio, verifica-se que a exatidão para as coordenadas planimétricas obtida nos experimentos realizados com

a APM são praticamente iguais às que foram obtidas com os experimentos realizados com a DLT. Igualmente como no caso da DLT, aqui também, todas as exatidões planimétricas obtidas são enquadradas no PEC planimétrico para a escala de 1/5000 – classe A. Com relação a exatidão altimétrica, verifica-se que a pequena tendência na determinação da componente altimétrica foi mantida. Comparando-se a Figura 77 com a Figura 79 verifica-se comportamento de tendência altimétrica em função da configuração dos pontos de apoio é praticamente idêntico. A mesma similaridade no valor do erro médio quadrático na altimetria, em cada uma das configurações de pontos de apoio, é facilmente verificada quando as figuras 78 e 80 são comparadas. Esses valores permitem concluir que as precisões e exatidões obtidas na determinação altimétrica são praticamente as mesmas obtidas com a DLT.

Esses resultados praticamente iguais entre os modelos DLT e APM confirmam que o modelo DLT é super-parametrizado para a aplicação requerida, pois em todas as configurações de pontos de apoio analisadas, o modelo APM não possui diferenças significativas, apesar do menor número de parâmetros.

Igualmente como foi concluído na DLT, a configuração (b) com 12 pontos de apoio, aqui na APM é também admitida como sendo a mais apropriada para a determinação altimétrica. O mesmo ocorre para uma aplicação exclusiva de determinação planimétrica, onde a configuração (f) com seis pontos de apoio também pode ser considerada como sendo suficiente.

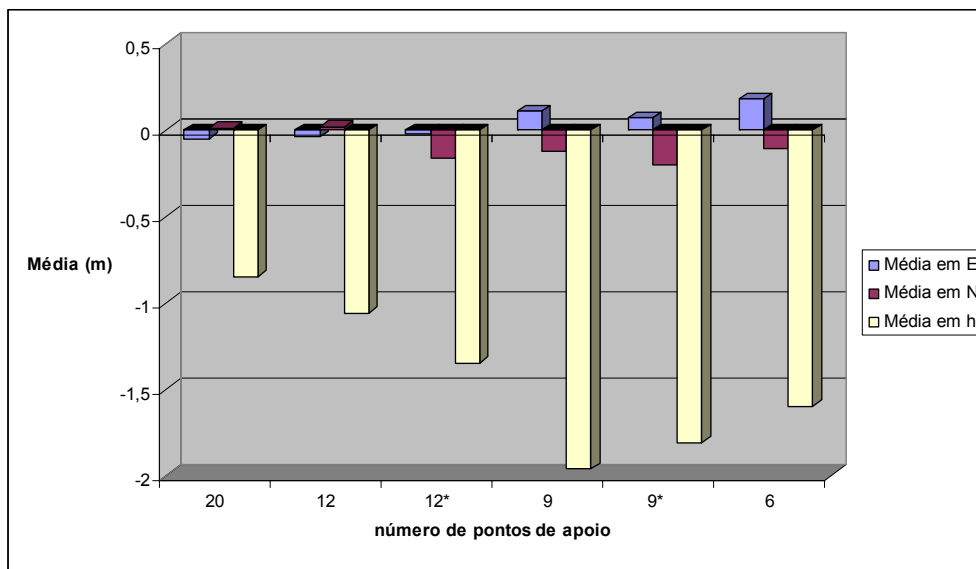


FIGURA 79 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO APM  
 FONTE: O autor (2011)

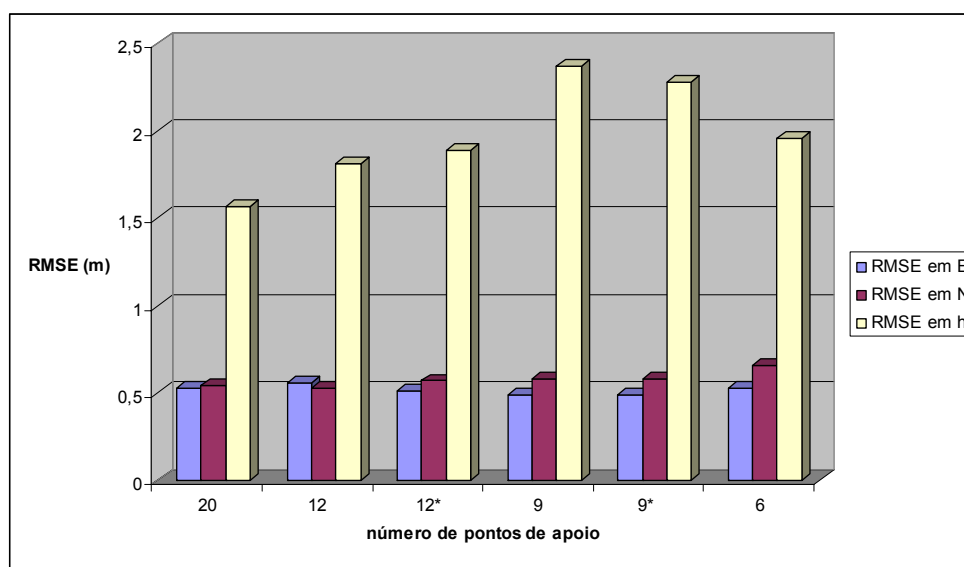


FIGURA 80 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS OBTIDAS COM O MODELO APM  
 FONTE: O autor (2011)

#### 4.2.6 Conclusões obtidas nos experimentos

Tendo como base os resultados obtidos nos experimentos realizados no estudo de configurações de pontos de apoio para os modelos aproximados e

rigorosos empregados nessa pesquisa, apresentam-se as principais conclusões obtidas:

- Qualquer configuração de pontos de apoio analisada nessa pesquisa para a orientação do par estereoscópico IKONOS II e intersecção espacial para determinação de coordenadas tridimensionais, empregando modelos rigoroso MR9, aproximados RFM, DLT e APM permite obter informações planimétricas com exatidão compatível com PEC altimétrico na escala de 1/5000 – classe A e para o caso do modelo rigoroso MR12 somente as configurações de apoio de (a) até (d);

- Devido a existência de tendência na determinação da componente altimétrica foi verificado que a exatidão altimétrica varia com a configuração de pontos de apoio. A configuração (b) com 12 pontos de apoio distribuídos, geometricamente por toda a região do par estereoscópico foi a que permitiu obter exatidão altimétrica enquadrada no PEC altimétrica na escala de 1/5000 – classe A em todos os modelos rigorosos e aproximados analisados, exceto o modelo RFM que permitiu a mesma classificação de exatidão com a configuração recomendada de somente seis pontos de apoio;

- De forma geral a configuração de seis pontos de apoio foi a mais apropriada para a obtenção de exatidão planimétrica enquadrada no PEC planimétrico na escala de 1/5000 – classe A, exceto o modelo RFM que permitiu a mesma classificação de exatidão com a configuração de somente um ponto de apoio e no MR12 a configuração (b) com 12 pontos de apoio;

- Foi verificada a existência de uma pequena tendência na determinação da componente altimétrica em todos os modelos analisados, empregando as seis principais configurações de pontos de apoio. Essa tendência pode estar relacionada com deformações geométricas presentes nas imagens, que podem estar relacionadas com a imprecisão dos coeficientes RPC da RFM ou a tendência têm causa na imprecisão da intersecção espacial;

- Os valores da exatidão altimétrica determinados com base nas

discrepâncias altimétricas, obtidas com as seis principais configurações de pontos de apoio com os modelos rigorosos e aproximados analisados, podem ser considerados como sendo admissíveis quando comparadas com a precisão altimétrica esperada, calculada em função da distância focal, altura da plataforma, base estereoscópica do par e um pixel para a precisão de medida.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temática de pesquisa desenvolvida nessa tese de doutoramento versou sobre a determinação de coordenadas tridimensionais usando um par de imagens IKONOS II (*Reference Stereo*). Trata-se de um estudo experimental que teve como principal objetivo a avaliação de desempenho dos principais modelos aproximados e rigorosos tradicionalmente empregados na orientação de imagens orbitais e determinação de coordenadas 3D via intersecção espacial. As análises de desempenho dos modelos fundamentaram-se na verificação das exatidões planimétrica e altimétrica obtidas nos experimentos realizados com diferentes configurações de pontos de apoio. O Padrão de Exatidão Cartográfico – PEC, estabelecido pelo decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, foi adotado como referência para as análises de exatidões obtidas.

Os padrões de exatidão planimétrica e altimétrica do PEC na escala de 1/5000 foram adotadas nos procedimentos de avaliação de exatidão obtidos nos experimentos realizados. Na altimetria considerou-se a representação do relevo por meio de curvas de nível com equidistância de 5 metros.

Os experimentos adotados para a realização do estudo proposto iniciaram com a verificação do desempenho do modelo de orientação de par com a utilização de um conjunto denso de pontos de apoio e análises de exatidões obtidas com base em discrepâncias planialtimétricas determinadas em pontos de verificação. Após a etapa de avaliação do modelo na aplicação, experimentos com diferentes configurações do número e geometria de distribuição de pontos de apoio no par foram realizados. Empregou-se seis configurações geométricas de pontos de apoio, tradicionalmente empregadas na orientação de imagem isolada ou par estereoscópico, variando de 20 a 6 pontos de apoio.

Os modelos aproximados testados nessa pesquisa foram a transformação linear direta – DLT, a transformação afim de projeção paralela – APM e o modelo de função racional – RFM, com coeficientes determinados pelo fornecedor das imagens. Os modelos rigorosos foram os modelos fundamentados nas equações de colinearidade com nove ou doze parâmetros que orientam e posicionam as imagens num dado referencial geodésico ou cartográfico.

Fundamentadas nos experimentos realizados são apresentadas as principais conclusões:

- Apesar dos modelos rigorosos MR9 e MR12 não serem apropriados para a orientação de imagens que foram geometricamente corrigidas, nos experimentos realizados foram obtidas exatidões planimétricas e altimétricas que as enquadram no PEC planialtimétrico na escala de 1/5000 – classe A;

- Não foi possível verificar diferenças significativas entre as exatidões planimétrica e altimétrica obtidas nos experimentos realizados com os dois modelos rigorosos testados nessa pesquisa;

- Comparando-se as exatidões planialtimétricas obtidas nos experimentos realizados com os modelos rigorosos e aproximados, como previsto, os modelos aproximados sempre tiveram melhor desempenho;

- Os experimentos realizados com os modelos aproximados apresentaram exatidões planialtimétricas aproximadamente iguais quando as configurações de até 12 pontos de apoio foram empregadas;

- Comparando-se as exatidões planimétricas obtidas com os modelos aproximados nos experimentos realizados com as principais configurações de pontos de apoio, verificou-se praticamente iguais a 0,4 metros. Entretanto nas transformações DLT e APM foi verificado um pequeno ganho de qualidade em todos os experimentos realizados com as diferentes configurações de pontos de apoio. Por outro lado, o modelo RFM possui grande vantagem quando o número de pontos de apoio é considerado, pois com esse modelo foi possível obter exatidão planimétrica

similar com a utilização de configuração de somente um ponto de apoio;

- Na determinação da componente altimétrica via intersecção espacial foi verificada uma pequena tendência na determinação. Apesar dessa tendência a exatidão altimétrica obtida nos experimentos realizados com configurações com até 12 pontos de apoio, apresentou valor que foi enquadrado no PEC altimétrico na escala de 1/5000 – classe A. Comparando-se as exatidões altimétricas obtidas nas configurações com menor número de pontos de apoio, o modelo RFM foi o que apresentou melhor desempenho, pois somente em uma configuração de pontos de apoio, a exatidão altimétrica não obteve enquadramento no PEC na escala de 1/5000 - classe A;

- A pequena tendência encontrada nos experimentos realizados pode estar relacionada com deformações presentes nas imagens provenientes do processo de correção geométrica ou relacionada com a imprecisão da determinação altimétrica na intersecção espacial empregada;

- Considerando-se a precisão da determinação da componente altimétrica o valor esperado igual a 1,6 metros ( valor determinado com relação a distância focal, altura de vôo, base estereoscópica e um pixel a precisão de medida), a exatidão altimétrica determinada nos experimentos realizados nessa pesquisa e que foram enquadrados no PEC da escala 1/5000 – classe A, possuem valores menores ou iguais ao valor admissível de 1,6 metros;

- De forma geral, a configuração com 12 pontos de apoio, distribuídos por toda a região do par estereoscópico foi a configuração recomendada nos modelos MR9, MR12, DLT e APM para a obtenção de informação altimétrica no experimento realizado nessa pesquisa, pois com essa configuração foi possível obter exatidão altimétrica compatível com PEC altimétrico na escala de 1/5000 – classe A. Somente no modelo RFM que a configuração de seis pontos de apoio foi a recomendada para as mesmas condições mencionadas;

- A configuração com 6 pontos de apoio foi a mais recomendada para a

obtenção de informações planimétricas compatível com PEC planimétrico na escala de 1/5000 – classe A nos modelos MR9, DLT e APM. Para o modelo RFM a configuração de somente um ponto foi a mais apropriada e para o MR12 a configuração de 12 pontos de apoio;

- Na inexistência dos coeficientes da RFM das imagens, a transformação Afim de Projeção Paralela – APM é a mais recomendada para a realização do experimento proposto, tendo em vista as facilidades computacionais e a inexistência de parâmetros não significativos na aplicação;

- Apesar dos excelentes resultados obtidos com a DLT para a realização do experimento proposto, a sua utilização não é recomendada, pois as condições de existência de correlações totais entre parâmetros e de modelo super-parametrizado, poderão provocar instabilidades na resolução do sistema de equações e facilidades na absorção de eventuais erros grosseiros existentes nas medidas.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Como a presente pesquisa foi baseada em estudo experimental que exigiu a realização de uma série de análises de resultados obtidos de experimentos realizados com diferentes configurações de dados, associados a um par de imagens geometricamente corrigidas de uma única região e sensor, recomenda-se a realização de pesquisas que visam dar continuidade a temática proposta e revalidação das principais conclusões apresentadas. Desta forma, os seguintes tópicos são recomendados:

- Realizar o mesmo estudo de avaliação de modelos aproximados e rigorosos empregando-se imagens geometricamente corrigidas de outros sensores de varredura linear tais como, QuickBird e Geoeye;
- Realizar o mesmo estudo de avaliação de modelos aproximados e rigorosos empregando-se imagens geometricamente corrigidas

IKONOS II com diferente relação Base/Altura e/ou grande variação de relevo;

- Realizar estudo similar de avaliação de modelos rigorosos e aproximados empregando-se imagens sem correção geométrica de sensores de varredura linear com diferentes configurações de pontos de apoio;
- Realizar estudo similar de avaliação de modelos rigorosos baseados em parâmetros físicos do sensor e as efemérides dos satélites.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-AZIZ, Y.I.; KARARA, H. M. Direct Linear Transform from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range. Photogrammetry, **Proceedings of the AUI/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry**, Urbana, v.1, n.18, 1971.
- AMORIM, A. **Utilização de modelos estereoscópicos híbridos na atualização cartográfica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000, 128p.
- BANG, K.; CHO, W. **Kompsat-EOC Sensor Model Analysis. Proceedings of FIG Working Week**. Seoul, Korea, 2001.
- BRASIL. Decreto nº. 89.817, de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 22 de junho de 1984.
- BREUER, M.; ALBERTZ, J. Geometric Correction of Airborne Wiskbroom Scanner Imagery Using Hibrid Auxiliary Data. In: ISPRS, 33, 2000, Amsterdam. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam: ISPRS, 2000.
- BRITO, J. L. N. S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia (IME), 2002.
- DAL POZ, A. P.; SCALCO, J. C. Orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. **Boletim em Ciências Geodésicas**, v.12, n.2, p.295-313, Curitiba, 2006.
- DIAL, G. Ikonos. Satellite Mapping Accuracy. **Proceedings of ASPRS Annual Conference**. Washington: DC, 2000.
- DIAL, G. et al. Satellite, imagery and products. **Remote Sensing of Environment**, n. 88, p.23-36, 2003.
- EL-MANADILI, Y.; NOVAK, K. Precision Rectification of SPOT Imagery using the Direct Linear Transformation Model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, 1996, p. 67-72

EPIPHANIO, J. C. N. CBERS: estado atual e futuro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009. p. 2001–2008.

FRASER, C. S.; DIAL, G; GRODECKI, J. Sensor orientation via RPCs. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 2006.

FRASER, C. S.; HANLEY, H. B.; YAMAKAWA, T. Sub-metre geopositioning with IKONOS geo imagery. **Proceedings of Joint ISPRS Workshop “High Resolution Mapping from Space 2001”**, Hanover, 2001

FRASER, C. S.; HANLEY, H. B.; YAMAKAWA, T. Three-Dimensional Geopositioning Accuracy of IKONOS imagery sub-metre geopositioning with IKONOS geo imagery. **Photogrammetric Record**, v. 17, n.99, p. 465 -479, 2002.

FRITSCH, D.; STALLMANN, D.; **Rigorous Photogrammetric Processing of High Resolution Satellite Imagery**, Amsterdam, v. 33, part B, 2000.

GALINDO, J. R. F. **Análise da reconstrução 3D a partir de um par estereoscópico HR-CCD/CBERS-2 usando dois modelos matemáticos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2008.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – COBRAC, 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis SC, 1994, p.41-48.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. UFPR. Curitiba. 1994. 315p.

GIANNONE, F. **A Rigorous Model for High Resolution Satellite Imagery Orientations**. Thesis, Department of Idraulica e Transporti e Strade, Faculty of Engineering, University of Rome, Roma, Italia, 2006.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.; **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda. 2000. 509p.

GRODECKI, J. Ikonos Stereo feature extraction – RPC approach. **Proceedings of ASPRS Annual Conference**, St. Louis, 23-27 abr. 2001, 7p

GRODECKI, J.; DIAL, G. IKONOS. Geometric Accuracy. **Proceedings of ISPRS Workshop “High Resolution Mapping from Space 2001”**. Hannover, Alemanha, 19-21 set. 2001.

GUGAN, D. J.; Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery. **Photogrammetric Record**, v. 12, n.69,1987. p.349 –355.

GUGAN, D. J.;DOWMAN, I. J.; Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery. **Photogrammetric Record**, v. 12, n. 72, 1988. p. 787-796.

JACOBSEN, K. Orientation of High Resolution Optical Space Images. **Proceedings of ASPRS Annual Conference**, Tampa, 07-11 maio 2007. p. 9

JENSEN, R. J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução da 2ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N.Epiphanyo (coordenador); Antônio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 2009. 672 p.

JUBANSKI, J. J.; Mitishita, E. A.; Avaliação da determinação de coordenadas tridimensionais extraídas de um par estereoscópico “EROS A”, Utilizando-se da “Direct Linear Transformation” (DLT). **Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação**, Recife, 2004.

KIM, T.; DOWMAN, I. *Comparision of two Physical Sensor Models for Satellite Images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model*. **The Photogrammetric Record**, v.21, n. 114, 2006. p. 110-123.

KIM, T.; KIM, H.; RHEE, S. *Investigation of Physical sensor models for modelling SPOT-3 orbits*. **The Photogrammetric Record**, v.22, n 119, p. 257-273, 2007.

KOCAMAN, S., Gruen, A. *Orientation and Self-calibration of ALOS PRISM Imagery*. **The Photogrammetric Record**, v. 23, n.123, 2008. p. 323-340.

LEHNER, M.; D’ANGELO, P.; MULLER, R.; REINARTZ, P. Stereo Evaluation of Cartosat-1 scientific assessment program. **International archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Beijing, v.37, 2008.

LUGNANI, J.B . **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: ed UFPR, 1987, 134p.

MADANI, M. Real-Time sensor-independent positioning by rational functions. **Proceedings of ISPRS Workshop on Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation**, Barcelona, Espanha, v.25-26, nov. 1999.



MARCATO JR, J. **Fotogrametria em bloco de imagens orbitais com modelos rigorosos baseados em pontos e retas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, 2011, 119p.

MEDEIROS, N. G. **Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas**. TESE (Doutorado em Ciências Cartográficas), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, 2007, 183p.

MERCHANT, D.C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: Technical Congress on Surveying and Mapping. *Proceedings*. v. 1, p. 222-231, 1982.

MERCHANT, D.C. **Analytical Photogrammetry: Theory and Practice**. Columbus, Ohio: Department of Geodetic Science, The Ohio state University, 1979.

MICHALIS, P.; DOWMAN, I. A model for along track stereo sensors using rigorous orbit mechanics. **Proceeding of the ISPRS Workshop**, Hanovers, 2005.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C.; **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações**. São José dos Campos: Inpe, 2011, 320p.

MORGAN, M. F. **Epipolar resampling of linear array scanner scenes**. Canada: *Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary*, Calgary, 2004

NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. TESE (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005, 186p.

NOGUEIRA JR., J. B. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente/SP, 2003. 143 p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações**. [S.l]: [s.n], 2010, 388p.

ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1994. p. 1431-1437.

POLI, D. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors. **Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry**, Zurich, Alemanha, 2005. 216 p.

RADHADEVI, P. V.; RAMACHANDRAN, R.; MURALI MOHAN, A. S. R. K. V. Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 1998.

RICHARDS, J. A.; JIA, X.; **Remote Sensing Digital Image Analysis: introduction**. 4. ed. Berlin: Springer, 2005. 439p.

SAHIN, N.; BAKICI, S.; ERKEK, B. An Investigation on High Resolution IKONOS Images for Cadastral Applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 2004.

SALAMONOWICZ, P. H.; Satellite Orientation and Position for Geometric Correction of Scanner Imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1986. p. 491- 499.

SAVOPOL, F.; ARMENAKIS, C. Modelling of the IRS-1C Satellite Pan Stereo-Imagery using DLT approach. **International archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, part 4. , p. 511-514.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**: TerraScience. Estados Unidos, 1999, 428p. v.1.

SINGH, G. **Improved geometric modeling of spaceborne pushbroom imagery using modified rational polynomial coefficients and the impact on DSM generation**. Netherlands: *Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, University of Twente*, Netherlands, 2008

TAO, C. V.; HU, Y. A comprehensive study on the rational function model for photogrammetric processing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 2000.

TITAROV, P. S. Evaluation of Cartosat 1 Geometric Potential. **International archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Beijing, v.37, 2008.

TOMÁS, L. R.; ALMEIRA, C. M.; OLIVEIRA, C. G.; FONSECA, L. M. G. Comparative analysis of the rigorous and the polynomial function models for the cartographic accuracy assessment of IKONOS orthoimages and DSMs. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.62, 2010.

VALADAN ZOEJ, M. J.; PETRIE, G. Mathematical Modelling and Accuracy *Testing of SPOT Level 1B Stereopairs*. **The Photogrammetric Record**, v.16, n 91, p. 67-82, 1998.

VALADAN ZOEJ, M. J.; SADEGHIAN, S. Rigorous and Non-Rigorous Photogrammetric Processing of IKONOS Geo Image. In: **ISPRS, Workshop "High resolution mapping from space"**. Hannover: ISPRS, 2003.

VOZIKIS, G.; FRASER, C. S.; JANSÁ, J.; Alternative sensor orientation models for high resolution satellite imagery. 23 . rd. **Scientific Conference of the German Society of Photogrammetry & Remote Sensing**. German Society of Photogrammetry, Berlin, 2003.

WANG, Y. Automated triangulation of linear scanner imagery. In: **Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen**, Universität Hannover, n. 18. Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4, Sensors and Mapping from Space, Hanover, sep. 27-30, 1999.

WOLF, P. R. 2000. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. McGraw-Hill, 624p.

XIONG, Z.; ZHANG, Y. Bundle adjustment with rational polynomial camera models based on generic method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n.1, 2011.

YAMAKAWA, T.; FRASER, C. S. The Affine Projection Model for Sensor Orientation: Experiences with High-Resolution Satellite Imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.35, part B1, 2004. p.142-147.

ZHANG, L. **Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images**. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry. Zurich, Alemanha, 2005. 2196 p.

## ANEXO A

Metadados do par estereoscópico IKONOS II – *Reference Stereo* Utilizado  
nessa pesquisa

=====

Version Number: 1.2

=====

### Company Information

#### Address

Space Imaging  
12076 Grant Street  
Thornton, Colorado 80241  
U.S.A.

#### Contact Information

On the Web: <http://www.spaceimaging.com>  
Customer Service Phone (U.S.A.): 1.800.232.9037  
Customer Service Phone (World Wide): 301.552.0537  
Customer Service Fax (World Wide): 301.552.3762  
Customer Service Email: [info@spaceimaging.com](mailto:info@spaceimaging.com)  
Customer Service Center hours of operation:

Monday - Friday, 7:00am - 11:00pm Eastern Standard Time

=====

### Product Order Metadata

Creation Date: 11/29/04  
Product Work Order Number: 00093969  
Product Order Number: 156631  
Customer Project Name: Araucaria Stereo PSM  
Ground Station ID: PGS  
License Type: Single Organization  
License Option 1: 1 Company / Corporation: engesat  
Product Order Area (Geographic Coordinates)

Number of Coordinates: 4

Coordinate: 1

Latitude: -25.6339604500 degrees  
Longitude: -49.4592328100 degrees

Coordinate: 2

Latitude: -25.5434878300 degrees  
Longitude: -49.4576192300 degrees

Coordinate: 3

Latitude: -25.5424427300 degrees  
Longitude: -49.3580068900 degrees

Coordinate: 4

Latitude: -25.6328260600 degrees  
Longitude: -49.3566053900 degrees

Product Order Area (Map Coordinates in Map Units)

Coordinate: 1

Map X (Easting): 654961.41 meters  
Map Y (Northing): 7173970.90 meters

Coordinate: 2

Map X (Easting): 664972.47 meters

Map Y (Northing): 7173966.69 meters  
 Coordinate: 3  
 Map X (Easting): 664989.25 meters  
 Map Y (Northing): 7163953.53 meters  
 Coordinate: 4  
 Map X (Easting): 654682.85 meters  
 Map Y (Northing): 7163951.79 meters  
 Sensor Type: Satellite  
 Sensor Name: IKONOS-2  
 Processing Level: Standard Geometrically Corrected  
 Image Type: PAN/MSI  
 Interpolation Method: Cubic Convolution  
 Multispectral Algorithm: Projective  
 Stereo: Mono  
 Mosaic: No  
 Map Projection: Universal Transverse Mercator  
     UTM Specific Parameters  
     Hemisphere: S  
     Zone Number: 22  
 Datum: WGS84  
 Product Order Pixel Size: 1.0000000000 meters  
 Product Order Map Units: meters  
 MTFC Applied: Yes  
 DRA Applied: Yes  
 Media: CD  
 Product Media Format: CD  
 File Format: GeoTIFF  
     TIFF Tiled: No  
     Bits per Pixel per Band: 11 bits per pixel  
 Multispectral Files: Separate Files

=====

#### Source Image Metadata

Number of Source Images: 2

Source Image ID: 2004112313421880000011625390  
 Product Image ID: 000  
 Sensor: IKONOS-2  
 Acquired Nominal GSD  
     Cross Scan: 0.84 meters  
     Along Scan: 0.84 meters  
 Scan Azimuth: 179.98 degrees  
 Scan Direction: Reverse  
 Panchromatic TDI Mode: 13  
 Nominal Collection Azimuth: 239.3661 degrees  
 Nominal Collection Elevation: 80.75264 degrees  
 Sun Angle Azimuth: 79.5997 degrees  
 Sun Angle Elevation: 70.42205 degrees  
 Acquisition Date/Time: 2004-11-23 13:42 GMT  
 Percent Cloud Cover: 0

-----

Source Image ID: 2004112313412890000011625389  
Product Image ID: 001  
Sensor: IKONOS-2  
Acquired Nominal GSD  
    Cross Scan: 0.90 meters  
    Along Scan: 0.99 meters  
Scan Azimuth: 179.98 degrees  
Scan Direction: Reverse  
Panchromatic TDI Mode: 13  
Nominal Collection Azimuth: 357.1232 degrees  
Nominal Collection Elevation: 65.14137 degrees  
Sun Angle Azimuth: 79.7835 degrees  
Sun Angle Elevation: 70.23682 degrees  
Acquisition Date/Time: 2004-11-23 13:41 GMT  
Percent Cloud Cover: 0

=====

Product Space Metadata

Number of Image Components: 4  
    X Components: 1  
    Y Components: 2  
Product MBR Geographic Coordinates  
    Number of Coordinates: 4  
        Coordinate: 1  
            Latitude: -25.5435169993 degrees  
            Longitude: -49.4603910136 degrees  
        Coordinate: 2  
            Latitude: -25.5424027848 degrees  
            Longitude: -49.3578344691 degrees  
        Coordinate: 3  
            Latitude: -25.6328768448 degrees  
            Longitude: -49.3565987163 degrees  
        Coordinate: 4  
            Latitude: -25.6339955668 degrees  
            Longitude: -49.4592323592 degrees  
Product Map Coordinates (in Map Units)  
    UL Map X (Easting): 654682.85 meters  
    UL Map Y (Northing): 7173970.90 meters  
Pixel Size X: 1.0000000000 meters  
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters  
Product Order Map Units: meters  
Columns: 10308 pixels  
Rows: 10024 pixels  
Reference Height: 907.9671630859 meters

=====

Product Component Metadata

Number of Components: 4  
  
Component ID: 0000000

Product Image ID: 000  
 Component File Name: po\_156631\_red\_0000000.tif po\_156631\_grn\_0000000.tif  
 po\_156631\_blu\_0000000.tif po\_156631\_nir\_0000000.tif  
 Thumbnail File Name: po\_156631\_rgb\_0000000\_ovr.jpg  
 Country Code: BR  
 Component Geographic Corner Coordinates  
 Number of Coordinates: 4  
 Coordinate: 1  
 Latitude: -25.5435027646 degrees  
 Longitude: -49.4590377495 degrees  
 Coordinate: 2  
 Latitude: -25.5424036775 degrees  
 Longitude: -49.3579140681 degrees  
 Coordinate: 3  
 Latitude: -25.5884667941 degrees  
 Longitude: -49.3572856825 degrees  
 Coordinate: 4  
 Latitude: -25.5895681441 degrees  
 Longitude: -49.4584480228 degrees  
 Component Map Coordinates (in Map Units)  
 UL Map X (Easting): 654818.85 meters  
 UL Map Y (Northing): 7173970.90 meters  
 Pixel Size X: 1.0000000000 meters  
 Pixel Size Y: 1.0000000000 meters  
 Product Order Map Units: meters  
 Columns: 10164 pixels  
 Rows: 5104 pixels  
 Percent Component Cloud Cover: 0

-----  
 Component ID: 0000001  
 Product Image ID: 000  
 Component File Name: po\_156631\_red\_0000001.tif po\_156631\_grn\_0000001.tif  
 po\_156631\_blu\_0000001.tif po\_156631\_nir\_0000001.tif  
 Thumbnail File Name: po\_156631\_rgb\_0000001\_ovr.jpg  
 Country Code: BR  
 Component Geographic Corner Coordinates  
 Number of Coordinates: 4  
 Coordinate: 1  
 Latitude: -25.5886887259 degrees  
 Longitude: -49.4598132489 degrees  
 Coordinate: 2  
 Latitude: -25.5875723736 degrees  
 Longitude: -49.3572282127 degrees  
 Coordinate: 3  
 Latitude: -25.6328408505 degrees  
 Longitude: -49.3566091680 degrees  
 Coordinate: 4  
 Latitude: -25.6339594586 degrees  
 Longitude: -49.4592328227 degrees  
 Component Map Coordinates (in Map Units)  
 UL Map X (Easting): 654682.85 meters  
 UL Map Y (Northing): 7168966.90 meters  
 Pixel Size X: 1.0000000000 meters

Pixel Size Y: 1.0000000000 meters  
 Product Order Map Units: meters  
 Columns: 10307 pixels  
 Rows: 5016 pixels  
 Percent Component Cloud Cover: 0

-----  
 Component ID: 0010000  
 Product Image ID: 001  
 Component File Name: po\_156631\_red\_0010000.tif po\_156631\_grn\_0010000.tif  
 po\_156631\_blu\_0010000.tif po\_156631\_nir\_0010000.tif  
 Thumbnail File Name: po\_156631\_rgb\_0010000\_ovr.jpg  
 Country Code: BR  
 Component Geographic Corner Coordinates  
 Number of Coordinates: 4  
 Coordinate: 1  
 Latitude: -25.5435027646 degrees  
 Longitude: -49.4590377495 degrees  
 Coordinate: 2  
 Latitude: -25.5424036775 degrees  
 Longitude: -49.3579140681 degrees  
 Coordinate: 3  
 Latitude: -25.5884667941 degrees  
 Longitude: -49.3572856825 degrees  
 Coordinate: 4  
 Latitude: -25.5895681441 degrees  
 Longitude: -49.4584480228 degrees  
 Component Map Coordinates (in Map Units)  
 UL Map X (Easting): 654818.85 meters  
 UL Map Y (Northing): 7173970.90 meters  
 Pixel Size X: 1.0000000000 meters  
 Pixel Size Y: 1.0000000000 meters  
 Product Order Map Units: meters  
 Columns: 10164 pixels  
 Rows: 5104 pixels  
 Percent Component Cloud Cover: 0

-----  
 Component ID: 0010001  
 Product Image ID: 001  
 Component File Name: po\_156631\_red\_0010001.tif po\_156631\_grn\_0010001.tif  
 po\_156631\_blu\_0010001.tif po\_156631\_nir\_0010001.tif  
 Thumbnail File Name: po\_156631\_rgb\_0010001\_ovr.jpg  
 Country Code: BR  
 Component Geographic Corner Coordinates  
 Number of Coordinates: 4  
 Coordinate: 1  
 Latitude: -25.5886887259 degrees  
 Longitude: -49.4598132489 degrees  
 Coordinate: 2  
 Latitude: -25.5875723736 degrees  
 Longitude: -49.3572282127 degrees  
 Coordinate: 3  
 Latitude: -25.6328408505 degrees



Longitude: -49.3566091680 degrees  
Coordinate: 4  
Latitude: -25.6339594586 degrees  
Longitude: -49.4592328227 degrees  
Component Map Coordinates (in Map Units)  
UL Map X (Easting): 654682.85 meters  
UL Map Y (Northing): 7168966.90 meters  
Pixel Size X: 1.0000000000 meters  
Pixel Size Y: 1.0000000000 meters  
Product Order Map Units: meters  
Columns: 10307 pixels  
Rows: 5016 pixels  
Percent Component Cloud Cover: 0

=====

## ANEXO B

Coeficientes do modelo RFM para a imagem 1: RPC 000

LINE\_OFF: +002552.00 pixels  
 SAMP\_OFF: +005082.00 pixels  
 LAT\_OFF: -25.56580000 degrees  
 LONG\_OFF: -049.40360000 degrees  
 HEIGHT\_OFF: +0908.000 meters  
 LINE\_SCALE: +002552.00 pixels  
 SAMP\_SCALE: +005082.00 pixels  
 LAT\_SCALE: +00.02380000 degrees  
 LONG\_SCALE: +000.05830000 degrees  
 HEIGHT\_SCALE: +0081.000 meters  
 LINE\_NUM\_COEFF\_1: -6.460915911624355E-03  
 LINE\_NUM\_COEFF\_2: +2.748340231664483E-02  
 LINE\_NUM\_COEFF\_3: -1.032328251273827E+00  
 LINE\_NUM\_COEFF\_4: -2.727724381858832E-03  
 LINE\_NUM\_COEFF\_5: -2.214700050520953E-02  
 LINE\_NUM\_COEFF\_6: +1.071571198612666E-03  
 LINE\_NUM\_COEFF\_7: -4.159635638581178E-02  
 LINE\_NUM\_COEFF\_8: +1.020397356298280E-03  
 LINE\_NUM\_COEFF\_9: +1.056965268655430E-01  
 LINE\_NUM\_COEFF\_10: -1.004526856907754E-04  
 LINE\_NUM\_COEFF\_11: -3.920365825151203E-05  
 LINE\_NUM\_COEFF\_12: +9.501155064329377E-06  
 LINE\_NUM\_COEFF\_13: -2.355176706796170E-05  
 LINE\_NUM\_COEFF\_14: +2.360681792670389E-06  
 LINE\_NUM\_COEFF\_15: -5.367248819473491E-05  
 LINE\_NUM\_COEFF\_16: +6.054783168271217E-05  
 LINE\_NUM\_COEFF\_17: -9.159332126553267E-05  
 LINE\_NUM\_COEFF\_18: +2.022882133823851E-05  
 LINE\_NUM\_COEFF\_19: +2.159391523521090E-04  
 LINE\_NUM\_COEFF\_20: -2.183728768082222E-07  
 LINE\_DEN\_COEFF\_1: +1.000000000000000E+00  
 LINE\_DEN\_COEFF\_2: +1.868743295684755E-02  
 LINE\_DEN\_COEFF\_3: -1.023191652674873E-01  
 LINE\_DEN\_COEFF\_4: +4.054450984096128E-02  
 LINE\_DEN\_COEFF\_5: +2.308128947614086E-05  
 LINE\_DEN\_COEFF\_6: +3.229917675309598E-05  
 LINE\_DEN\_COEFF\_7: -2.119385712561651E-04  
 LINE\_DEN\_COEFF\_8: +1.935922240559018E-06  
 LINE\_DEN\_COEFF\_9: -5.876672909891930E-05  
 LINE\_DEN\_COEFF\_10: +9.042079546806726E-05  
 LINE\_DEN\_COEFF\_11: +1.679759285933110E-09  
 LINE\_DEN\_COEFF\_12: +1.156366832022639E-09  
 LINE\_DEN\_COEFF\_13: +3.441990257443869E-10  
 LINE\_DEN\_COEFF\_14: -3.591888198255138E-09  
 LINE\_DEN\_COEFF\_15: +7.098233335029656E-09  
 LINE\_DEN\_COEFF\_16: +1.862097075963304E-09  
 LINE\_DEN\_COEFF\_17: +5.944130941482838E-09  
 LINE\_DEN\_COEFF\_18: -8.421238007380682E-09

LINE\_DEN\_COEFF\_19: +6.134072617487863E-08  
 LINE\_DEN\_COEFF\_20: -5.489180688020829E-09  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_1: +9.031506642302040E-02  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_2: +1.154235172437502E+00  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_3: -3.002137914627306E-03  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_4: +5.891114116927682E-03  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_5: -1.175809524603444E-01  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_6: +4.692544442293843E-02  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_7: -1.254223356152322E-05  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_8: +2.154866040301968E-02  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_9: -6.463740163985668E-04  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_10: +9.877600194619463E-05  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_11: -2.505846375243624E-04  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_12: +2.549853521324872E-06  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_13: -9.107382078367501E-05  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_14: +1.104458972215680E-04  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_15: +2.983355605568914E-05  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_16: -8.852705718202836E-08  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_17: -6.712434725889915E-07  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_18: +4.064035696153477E-05  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_19: +2.981138227718541E-07  
 SAMP\_NUM\_COEFF\_20: +2.098210070511885E-07  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_1: +1.000000000000000E+00  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_2: +1.868743295684755E-02  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_3: -1.023191652674873E-01  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_4: +4.054450984096128E-02  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_5: +2.308128947614086E-05  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_6: +3.229917675309598E-05  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_7: -2.119385712561651E-04  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_8: +1.935922240559018E-06  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_9: -5.876672909891930E-05  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_10: +9.042079546806726E-05  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_11: +1.679759285933110E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_12: +1.156366832022639E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_13: +3.441990257443869E-10  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_14: -3.591888198255138E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_15: +7.098233335029656E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_16: +1.862097075963304E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_17: +5.944130941482838E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_18: -8.421238007380682E-09  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_19: +6.134072617487863E-08  
 SAMP\_DEN\_COEFF\_20: -5.489180688020829E-09

=====

Coeficientes do modelo RFM para a imagem 1: RPC 001

LINE\_OFF: +002552.00 pixels  
 SAMP\_OFF: +005082.00 pixels  
 LAT\_OFF: -25.56590000 degrees  
 LONG\_OFF: -049.40350000 degrees  
 HEIGHT\_OFF: +0908.000 meters  
 LINE\_SCALE: +002552.00 pixels  
 SAMP\_SCALE: +005082.00 pixels  
 LAT\_SCALE: +00.02490000 degrees

LONG\_SCALE: +000.06210000 degrees  
HEIGHT\_SCALE: +0081.000 meters  
LINE\_NUM\_COEFF\_1: -2.066113857107563E-03  
LINE\_NUM\_COEFF\_2: +2.938399287711056E-02  
LINE\_NUM\_COEFF\_3: -1.080832067291034E+00  
LINE\_NUM\_COEFF\_4: +1.483711923365595E-02  
LINE\_NUM\_COEFF\_5: -9.756161911875574E-03  
LINE\_NUM\_COEFF\_6: -4.245144816145759E-04  
LINE\_NUM\_COEFF\_7: +2.221342415694150E-02  
LINE\_NUM\_COEFF\_8: +8.758941244880439E-04  
LINE\_NUM\_COEFF\_9: -5.203304301782618E-02  
LINE\_NUM\_COEFF\_10: -2.945078967965307E-04  
LINE\_NUM\_COEFF\_11: -1.368906329279558E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_12: +5.882150048644128E-06  
LINE\_NUM\_COEFF\_13: -6.144771813694394E-06  
LINE\_NUM\_COEFF\_14: -8.576212559831692E-07  
LINE\_NUM\_COEFF\_15: +2.885370767550831E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_16: -2.814001399473488E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_17: +3.518708547257005E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_18: -1.179964282987580E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_19: -7.898272101098906E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_20: -4.628041663444744E-07  
LINE\_DEN\_COEFF\_1: +1.000000000000000E+00  
LINE\_DEN\_COEFF\_2: +1.031829938749093E-02  
LINE\_DEN\_COEFF\_3: +4.814760580302750E-02  
LINE\_DEN\_COEFF\_4: -1.988898148950992E-02  
LINE\_DEN\_COEFF\_5: +5.483342425185839E-06  
LINE\_DEN\_COEFF\_6: +1.536802865941467E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_7: +7.371867845639832E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_8: -1.612876173248482E-06  
LINE\_DEN\_COEFF\_9: +2.611337739127962E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_10: -3.168298216659705E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_11: -1.120585738474867E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_12: -6.189750541649504E-10  
LINE\_DEN\_COEFF\_13: -1.082855147285496E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_14: +2.291965274763640E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_15: -5.296888806778173E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_16: -6.005050522603893E-10  
LINE\_DEN\_COEFF\_17: -1.543946108373220E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_18: +1.252505013143161E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_19: -2.458490910153537E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_20: +2.450055791550786E-09  
SAMP\_NUM\_COEFF\_1: +9.226496506124560E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_2: +1.228621609062446E+00  
SAMP\_NUM\_COEFF\_3: +1.096994539871051E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_4: -1.567359413643790E-03  
SAMP\_NUM\_COEFF\_5: +5.943137910748335E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_6: -2.425134336389448E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_7: -1.264258731864025E-04  
SAMP\_NUM\_COEFF\_8: +1.267903025363818E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_9: +3.137220932572746E-04  
SAMP\_NUM\_COEFF\_10: -7.980143314053965E-06  
SAMP\_NUM\_COEFF\_11: +9.321284144271623E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_12: -1.707337721577718E-06

SAMP\_NUM\_COEFF\_13: +4.418531540047167E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_14: -4.208393530792451E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_15: +9.922370220872599E-06  
SAMP\_NUM\_COEFF\_16: +2.691720639563357E-08  
SAMP\_NUM\_COEFF\_17: +1.479357423638423E-07  
SAMP\_NUM\_COEFF\_18: +2.043162161974439E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_19: -2.428399525391514E-07  
SAMP\_NUM\_COEFF\_20: -1.354028457774240E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_1: +1.000000000000000E+00  
SAMP\_DEN\_COEFF\_2: +1.031829938749093E-02  
SAMP\_DEN\_COEFF\_3: +4.814760580302750E-02  
SAMP\_DEN\_COEFF\_4: -1.988898148950992E-02  
SAMP\_DEN\_COEFF\_5: +5.483342425185839E-06  
SAMP\_DEN\_COEFF\_6: +1.536802865941467E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_7: +7.371867845639832E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_8: -1.612876173248482E-06  
SAMP\_DEN\_COEFF\_9: +2.611337739127962E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_10: -3.168298216659705E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_11: -1.120585738474867E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_12: -6.189750541649504E-10  
SAMP\_DEN\_COEFF\_13: -1.082855147285496E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_14: +2.291965274763640E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_15: -5.296888806778173E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_16: -6.005050522603893E-10  
SAMP\_DEN\_COEFF\_17: -1.543946108373220E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_18: +1.252505013143161E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_19: -2.458490910153537E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_20: +2.450055791550786E-09